

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Jiří Hruban

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Návrh nástrojů pro obrábění plastů a kompozitních materiálů

Design of Tools for Machining Plastics and Composite Materials

Student:	Jiří Hruban
Osobní číslo:	HRU0206
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Vladimír Vrba, Csc.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Hruban**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Návrh nástrojů pro obrábění plastů a kompozitních materiálů**
Design of Tools for Machining Plastics and Composite Materials
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Problematika obrábění plastů a kompozitů.
3. Vlastní návrh vhodných řezných nástrojů.
4. Diskuze experimentů.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

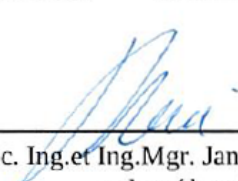
BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
BRYCHTA, Josef; SADÍLEK, Marek; ČEP, Robert; PETRŮ, Jana. *Progresivní metody v obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava, 2011, 144 s. ISBN 978-80-248-2513-7. Dostupné na: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINAL.pdf
SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil informace a podklady z firmy Dormer Pramet, s. r. o., Šumperk, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....
Podpis studenta

Prohlášení spolupracující osoby

Dle požadavku čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských studijních programech VŠB – TU Ostrava. Souhlasím se zveřejněním bakalářské práce pana Jiřího HRUBANA s názvem „Návrh nástrojů pro obrábění plastů a kompozitních materiálů“ vytvořené v roce 2020.

Spolupracující osoba: Ing. Roman Maršíček

Dormer Pramet s. r. o.

Uničovská 2, 787 53 Šumperk

Jméno a příjmení oprávněné osoby: Ing. Roman Maršíček

V Šumperku dne 18.5.2020



.....
Podpis oprávněné osoby

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HRUBAN, J. *Návrh nástrojů pro obrábění plastů a kompozitních materiálů: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 53 s. Vedoucí práce: Vrba, V.

Bakalářská práce se zabývá návrhem nebo doporučením vhodných obráběcích nástrojů pro obrábění především kompozitních materiálů. Teoretická část je věnována charakteristice materiálů a problematice obrábění úzce spojené s použitým materiálem v experimentu. Praktická část je zaměřena na porovnání fréz vhodných pro obrábění kompozitních materiálů na základě hodnot řezných sil a drsností získaných při experimentu. Veškeré údaje byly zpracovány a výsledná doporučení jsou uvedena v závěru.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

HRUBAN, J. *Design of Tools for Machining Plastics and Composite Materials: Bachelor Thesis*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 53 s. Thesis head: Vrba, V.

The bachelor's thesis deals with the design or recommendation of suitable machining tools for machining mainly composite materials. The theoretical part is devoted to the characteristics of materials and the issue of machining closely related to the material used in the experiment. The practical part is focused on the comparison of cutters suitable for machining composite materials based on the values of cutting forces and roughness obtained in the experiment. All data were processed and the resulting recommendations are given in the conclusion.

OBSAH

Seznam použitých zkratk a značek	10
ÚVOD	12
1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU	13
1.1 Rozdělení nekovových materiálů	14
2 PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ PLASTŮ A KOMPOZITŮ	15
2.1 Charakteristika plastů a kompozitních materiálů	15
2.1.1 Historie	17
2.2 Rozdělení plastů a kompozitních materiálů	18
2.2.1 Termoplasty	18
2.2.2 Reaktoplasty	19
2.2.3 Uhlíková vlákna	22
2.3 Výroba plastů a kompozitních materiálů	23
2.4 Vlastnosti kompozitních materiálů	26
2.5 Obrábění kompozitních materiálů	27
2.5.1 Technologie frézování	27
2.5.2 Teplo při frézování kompozitů	28
2.5.3 Delaminace	28
2.6 Teorie tvorby třísky kompozitních materiálů	29
3 VLASTNÍ NÁVRH VHODNÝCH ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	31
3.1 Klasifikace výběru nástrojů pro obrábění kompozitů	31
3.1.1 Řezné materiály	31
3.1.2 Řezné podmínky	33
3.1.3 Opotřebení řezného nástroje	33
4 DISKUZE EXPERIMENTŮ	35
4.1 Průběh uskutečněného experimentu	35
4.2 Testované nástroje	35
4.2.1 Typová řada nástroje JC860	36
4.2.2 Typová řada nástroje JC870	37
4.2.3 Typová řada nástroje JC880	38
4.3 Charakteristika obrobeného materiálu	39
4.4 Řezné podmínky	40
4.4.1 Frézování kontury	40
4.4.2 Frézování drážky	41
4.5 Naměřené hodnoty	42

4.5.1	Frézování kontury	42
4.5.2	Frézování drážky	44
4.6	Kvalita obrobeného povrchu	45
4.7	Vyhodnocení.....	46
5	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	47
	ZÁVĚR	48
	Seznam použité literatury	50
	Seznam obrázků	52
	Seznam tabulek	53

Seznam použitých zkratk a značek

Zkratka	Definice
CRFP	„Carbon-fiber-reinforced polymer“ – polymer vyztužený uhlíkovými vlákny
CVD	„Chemical Vapour Deposition“ – chemické depozice z plynné fáze
DURA	diamantový povlak
EP	epoxid
HM	„High Modulus“ – vysoký modul pružnosti
HS	„High Strength“ – vysoká pevnost
P	„pitch“ – smola
PA	polyamid
PAN	polyakrylonitril
PE	polyethylen
PES	polyester
PF	fenolformaldehyd
PKD	Polykrystalický diamant
PMMA	polymethylmetakrylát
PP	polypropylen
PS	polystyren
PTFE	polytetrafluorethylen
PUR	polyuretan
PVC	polyvinylchlorid
PVD	„Physical Vapour Deposition“ – fyzikální depozice z plynné fáze
SI	silikon
SK	slinutý karbid
UHM	„Ultra-High Modulus“ – ultra vysoký modul pružnosti
UHS	„Ultra-High Strength“ – ultra vysoká pevnost
VBD	výměnná břitová destička

Značka	Definice	Jednotka
ρ	hustota	$[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$
a_{Cu}	rázová houževnatost	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^2]$
a_e	šířka záběru	$[\text{mm}]$
a_p	hloubka řezu	$[\text{mm}]$
E	modul pružnosti	$[\text{GPa}]$
F_f	posuvová složka řezné síly	$[\text{N}]$
F_{fn}	radiální složka posuvové síly	$[\text{N}]$
n	otáčky	$[\text{ot./min}]$
R_a	střední aritmetická úchylka profilu	$[\text{mm}]$
R_z	výška nerovnosti	$[\mu\text{m}]$
v_c	řezná rychlost	$[\text{m/min}]$
v_f	posuvová rychlost	$[\text{mm/min}]$

ÚVOD

Jedním z nejstarších, a tudíž i nejobsáhlejších technických oborů je strojírenství. Pod tímto výrazem se ukrývá mnoho různých podob řešení a problematiky spojené s technickým odvětvím. Každým dnem se svět posouvá kupředu a tím mění i nároky požadované ve strojírenství. Mezi hlavní patří co nejmenší náklady, kvalita, produktivita i efektivita.

Strojírenství se neobejde bez použití materiálu. Jde o velké množství technických materiálů, které tak tvoří rozsáhlou skupinu používající se pro různé účely. Základní dělení těchto materiálů z hlediska obsahu látek je následovné. Materiály kovové a nekovové.

V dnešním moderním strojírenství jsou kladeny na vlastnosti součástí takové nároky, kterých nelze docílit použitím běžných kovových materiálů. V první řadě to jsou konstrukční požadavky, jenž můžeme využitím plastů nebo kompozitních materiálů uskutečnit.

Jedním z prvních úkolů při navrhování technologie by mělo být zařazení obráběného materiálu do skupiny, která v sobě sdružuje materiály vyvolávající kvalitativně stejné namáhání břitu.

Jedním z nejběžněji používaných standardů v této oblasti je norma ISO 513, která vznikla již v padesátých letech minulého století a rozdělovala řezné materiály podle obráběných. Původně tato norma rozdělovala obráběné materiály do třech a od roku 2004 do šesti skupin. Je zde však skupina materiálů, která se používá ve strojírenství a která sem zcela nezapadá a sice nekovové materiály, respektive plasty a kompozitní materiály, a právě těmito materiály se bude má práce zabývat.

1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU

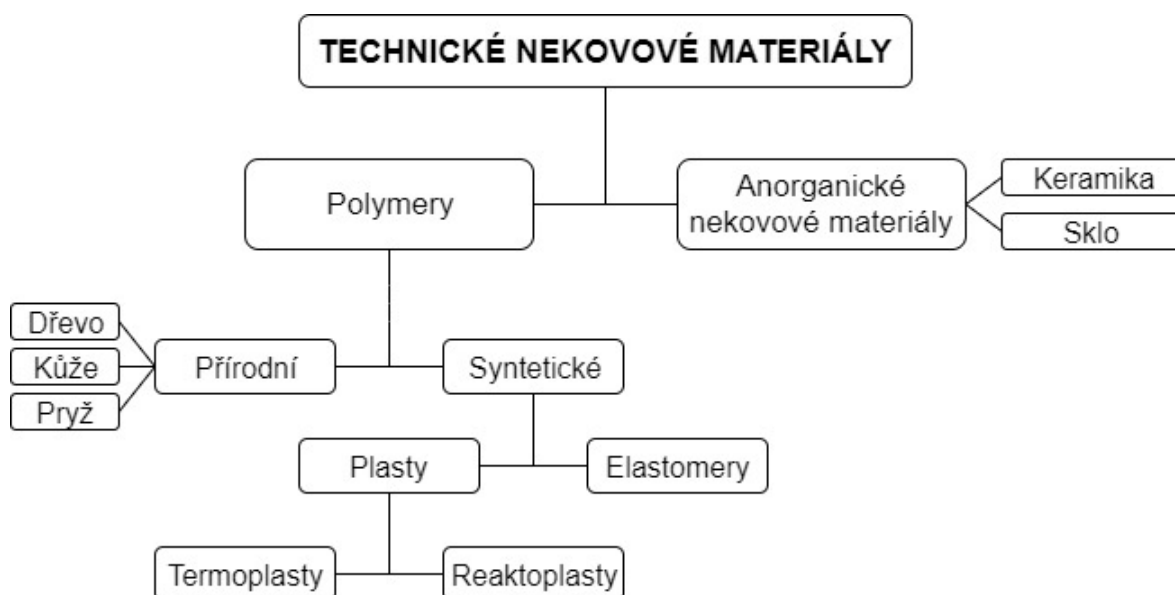
Plasty a kompozity všeobecně nekovové materiály (viz 1.1) se nedají s určitostí zařadit do skupiny materiálů dle ISO 513. Podle některých výrobců nástrojů jsou plasty a kompozity zařazovány do skupiny N, která je pro tyto účely přespecifikována jako neželezné materiály. Je možné se setkat i s interním firemním označením (většinou písmeno O v bílém poli).

P	uhlíkové (nelegované) oceli třídy 10, 11, 12 nízko a středně legované oceli sk. 13 (13 0., 13 1., legované oceli tříd 14, 15, 16 feritické a martenzitické korozivzdorné oceli (tř. 17 a lité 4229..) nástrojové oceli uhlíkové (19 1., 19 2., 19 3..) legované nástrojové oceli (19 3.. až 19 8..) uhlíková ocelolitina sk. 26 (4226..) nízko a středně legované ocelolitin sk. 27 (42 27..)
M	austenitické a feriticko-austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli nemagnetické a otěruvzdorné
K	šedé litiny nelegované i legované (42 24..) tvárné litiny (42 23..) temperované litiny (42 25..)
N	neželezné kovy, slitiny Al a Cu
S	speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti
H	zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa kalené oceli HRC 48 - 60 tvrzené kokilové litiny HSh 55 - 85

Obrázek 1.1 – Skupina materiálů dle ISO 513 [1]

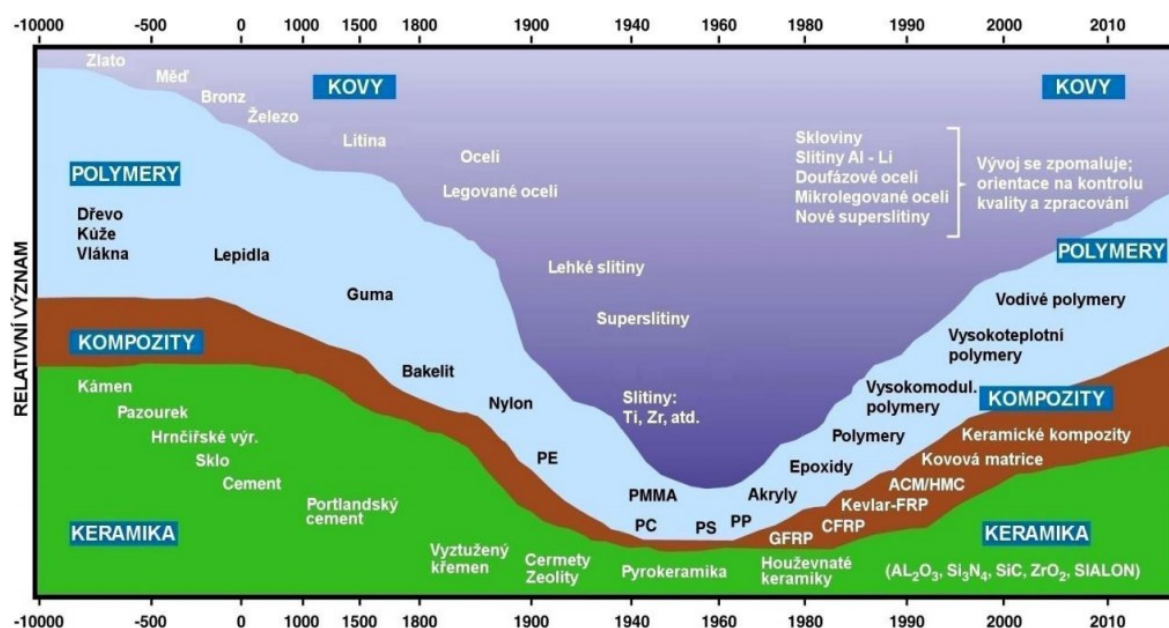
1.1 Rozdělení nekovových materiálů

Nekovové materiály jsou obsáhlou skupinou technických materiálů, které jsou využívány ve strojírenství a mají velký význam i pro další průmyslová odvětví. Lze je rozdělit na dvě velké podskupiny, a to zejména polymery a anorganické nekovové materiály (část kompozitních materiálů o nekovovém základu). Do této skupiny spadají především plasty, dřevo, pryž, sklo, keramika, kůže aj. Některými těmito materiály jsou nahrazovány kovy železné i neželezné [2].



Obrázek 1.2 – Schéma základního rozdělení technických nekovových materiálů

Na obrázku 1.3 je zobrazené široké spektrum materiálů. Je zde také vidět hranice mezi kovy a látkami tvořené převážně z polymeru.



Obrázek 1.3 – Přehled různých materiálů [3]

2 PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ PLASTŮ A KOMPOZITŮ

S ohledem na provedený experiment, ve kterém byl frézován uhlíkový kompozit, se pro lepší pochopení problematiky s ním spojené zaměřím v další části práce hlavně na kompozitní materiály.

2.1 Charakteristika plastů a kompozitních materiálů

Plasty jsou materiály složené převážně z organických makromolekulárních látek (polymerů). Kromě látek polymerní povahy obsahují plasty aditiva (příměsné látky, které mohou zcela ovlivnit vlastnosti výsledného materiálu). Přidávají se během výroby [4].

Obsahují především dva hlavní prvky – uhlík (C) a vodík (H). Dalšími prvky nacházející se ve sloučeninách jsou kyslík (O), dusík (N), chlór (Cl), a jiné. Jejich molekuly nejsou uspořádány pravidelně, proto nemají jednoznačně určený bod tání [2].

Obecně plasty mají tři základní složky [5, 6]:

- **Pojivo** – do něj se přidávají plnidla a přísady,
- **plniva** – různé látky, jenž zvětšují objem a upravují vlastnosti,
- **přísady** – přidavné látky, které také ovlivňují výsledné vlastnosti.

Mezi přísady patří v první řadě [4]:

- **Antioxidanty** – brání jejich příkladnému rozkládání vzdušným kyslíkem,
- **barviva (Pigmenty)** – určují požadovaný odstín, barvu. mohou chránit proti účinkům UV záření,
- **maziva** – usnadňují zpracování polymerů,
- **nadouvadla** – u lehčených hmot. Při zpracování uvolňují plyny a vytvářejí pěnovou strukturu hmoty,
- **retardéry hoření** – zpomalující proces hoření nebo mu přímo zabraňují,
- **stabilizátory** – zpomalují degradační procesy, případně zabraňují stárnutí,
- **tvrdidla** – snižují tvárnost a zvyšují mechanickou odolnost,
- **změkčovadla** – zlepšují ohebnost, rázovou houževnatost a tekutost taveniny (obecně tvárnost).

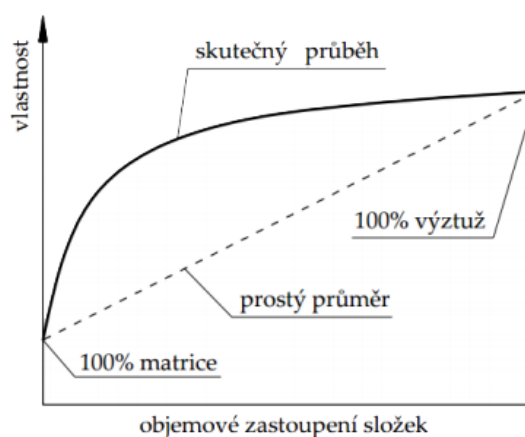
Kompozitní materiály se skládají ze dvou nebo více chemicky různých složek (fází). Jedna ze složek je nespojitá a nazývá se výztuž, většinou bývá tvrdší, tužší a pevnější. Protějšek k tomu je spojitá a obvykle poddajnější složka. Ta plní funkci pojiva výztuže a je známá pod názvem matrice. Navíc mohou kompozity mít vyztužující fáze různých rozměrů. Velký význam nesou ve strojírenství mikrokompozitní materiály a nanokompozity materiály [7].

Makrokompozity disponují výztuží o velikosti příčného rozměru 10^0 až 10^2 mm a jsou upotřebeny hlavně ve stavebnictví, jako železobeton (beton vyztužený ocelovými lany nebo pruty, obsahující rozdrčené kamenivo a pryskyřici – polymerbeton. Za makrokompozity je možno pokládat i vícevrstvé materiály.

Nanokompozity jsou kompozity, které mají rozměr výztuže v nano jednotkách. Jde o zcela nový ojedinělý materiál, jehož potenciál lze těžko odhadnout. Při nízkých teplotách mohou být supravodivé a vodivost lze ovlivňovat přítomností iontů.

Synergismus

Jde o hlavní výhodu kompozitních materiálů. Podstatou je, že vlastnosti kompozitu jsou lepší než poměrný součet vlastností jednotlivých složek. Kompozity jsou složené materiály, u kterých se po smísení materiálů s různými vlastnostmi vytvoří nová, unikátní struktura [8].



Obrázek 2.1 – Synergický efekt [9]

Charakteristika výztuže

Pevnost vláken narůstá se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty struktury jsou malé i u vláken malých průměru a jsou vhodně natočené svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. Pevnost vlákna rovněž závisí na délce vlákna. Úseky vytvořené porušením vlákna při tahovém namáhání mají větší pevnost než vlákno původní, jelikož u prvotního lomu došlo z největšího defektu vlákna. Většina produkovaných vláken má kruhový průřez o průměru 5 až 20 μm . Průměry menších rozměrů se nepoužívají z technologických důvodů [8].

Charakteristika matrice

Podstatným úkolem matrice je slučování vyztužujících fází a ochraňovat ji před účinky okolí. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Při tahovém namáhání matrice by mělo být mezní poměrné prodloužení větší než mezní prodloužení vláken [8].

2.1.1 Historie

Plasty jsou jedny z nejmladších skupin mezi konstrukčními materiály. Vůbec prvním plastem byla v roce 1855 umělá slonovina, chemický nitrát celulózy, který nesl název parkesin po svém vynálezci. Tím byl Angličan Alexander Parkes. Jako další příklad bych uvedl polyetylen, který připravil poprvé Hans von Pechmann roku 1891 [10].

Výrobní počátky průmyslové výroby plastů zasahují do období mezi I. a II. světovou válkou, kdy započala první výroba vinylových plastů (PVC, polystyren). Ve 30. letech minulého století byla také zjištěna syntéza prvního polyamidu (Nylonu). Ve stejném období začal značný rozvoj bádání i produkce u mnoha dalších plastů [11].

Úpadek světového průmyslu, způsobený do jisté míry II. světovou válkou, zapříčinil hledání nových levných materiálů jakožto náhrada všedních látek. Nyní je světová výroba plastů větší než kovů, což je přiměřené ke dnešní spotřebě plastů. Ty mají uplatnění ve všech průmyslových odvětvích a také v domácnostech či obchodech [11].

Kompozitní materiály jsou lidmi používány už od jeho raného vývojového období. Jeden z prvotních využití bylo ve stavebnictví na výrobu nepálených cihel a jednalo se o vláknové kompozitní materiály. Cihly obsahovali směs jílu (pojiva) a organických, přírodních celulózových vláken (výztuž). Došlo tak k prvnímu cílenému sloučení dvou materiálů, aby se spojily jejich příznivé vlastnosti [12].

V bližším časovém horizontu se větší povědomí o kompozitech šíří od počátku dvacátého století a je spojováno s objevem fenolické pryskyřice zpevněné dřevnou nebo kamennou moučkou v roce 1907. Nese název bakelit, připravil ji belgicko-americký chemik prof. Leo Henrik Baekeland a je to první hlavní milník mezi kompozity [13].

Dalším důležitým milníkem byl začátek první průmyslové výroby skleněných vláken, kterou zahájila v roce 1933 firma Owens-Illinois Glass v USA. O 2 roky později byl vynalezen laminát. Vlivem II. Světové války se celý proces hledání dalších kompozitních materiálů vyráběných z ropy. Ke konci 50. let dvacátého století vznikly sofistikovanější kompozitní materiály, jako jsou například uhlíková vlákna a Kevlar. Kevlar je obchodní značka para-aramidového vlákna, které objevila chemička Stephanie Kwoleková u firmy DuPont v roce 1965 [14].

Obrovský rozmach využití kompozitů byl zaznamenán obzvlášť v dopravním průmyslu, letectví a námořní technice pro vojenské účely. Dále se začaly využívat pro konstrukci sportovních potřeb, a silnoproudé elektrotechniky, čímž se stal komerčními [15].

2.2 Rozdělení plastů a kompozitních materiálů

Plasty

Nejznámějším dělením je podle zpracovatelnosti po zahřátí. Plasty, s ohledem na jejich změnu struktury v závislosti na teplotě, se dělí na dvě velké skupiny. Pokud se plasty zahřívají, dojde k rozkmitání nejdříve menších a následně větších skupin makromolekul.

U první skupiny plastů tak dojde k porušení soudržných mezimolekulárních sil. To se projeví změknutím původně dostatečně tvrdého polymeru, které když narůstá, dojde ke vzniku viskózní tekuté hmoty. Ve stavu plastickém se potom dá plast tvářet, a proto se této skupině říká termoplasty [7].

Druhou skupinu materiálů představují materiály, které po dodání tepelné energie pod podmínkou, že zesíťované polymery vytvořily prostorově propojené řetězce, není možné výše uvedeným způsobem narušit. Husté, prostorové zesíťování je způsobeno katalyzátory v procesu tváření plastu. Jedná se o vytvrzování a takto vzniklé hmoty se nazývají reaktoplasty, dříve známé pod pojmem termosety) [7].

2.2.1 Termoplasty

Polyethylen (PE) – nejpoužívanější polymer na světě, odolává kyselinám i zásadám, teplotám do 75 °C, je dobrý izolant. měkký PE při teplotách pod 0 °C nekřehne a je ohebný. Je vhodný pro svoji chemickou stálost pro výrobky v lékařství, potravinářském průmyslu, konkrétně se z něj vyrábí fólie na balení potravin, hadice, ubrusy, sáčky, ve strojírenství jako protikorozi ochrana kovů povlakováním [11].

Polypropylen (PP) – fyzikálně-chemické vlastnosti obdobné polyethylenu. Křehký za nízkých teplot, měkký za teplot 140–150 °C a při teplotě v rozmezí 160–170 °C se taví. Použitelnost tam, kde nevyhovují vlastnosti polyethylenu. Aplikace v textilním, potravinářským průmyslu pro výzkumní účel. Použit při výrobě lan, provazů [11].

Polyvinylchlorid (PVC) – jeden z nejvíce používaných plastů

- Tvrdý PVC – dobrou tvrdost, ale je křehkost, odolný proti kyselinám i zásadám, má dobrou pevnost, možnost užití do teploty 60 °C. Využívá se jako náhrada nerez. ocelí pro jeho odolnosti proti chemikáliím. Slouží pro výrobu potrubí, nádrží.
- Měkčený PVC – vznik ohebného a měkkého materiálu po přidání změkčovadel. Při teplotách pod 0 °C křehne a při ohybu praská, vyrábí se z něj obuv, hračky, koženka, tapety, izolace vodičů a další.

- Směs PVC s chlórovaným polyetylénem – trochu křehký, ale odolný proti povětrnostním účinkům. Vyrábí se okapy, potrubní díly pro odpady.

Polystyren (PS) – v nelehčené formě tvrdý, ale křehký plast, který odolává kyselinám i zásadám. Čirý snadno barvitelný polymer styrenu a dělají se z něj hračky, hřebeny a obalový materiál. Dobře a zpracovává. Odolný teplotám do 75 °C, užívá se k tepelné a zvukové izolaci [11]

Polymethylmetakrylát (PMMA) –plexisklo je netříštivé organické sklo, mechanické vlastnosti stejné do teploty 80 °C, čiré zcela bezbarvé a používá se na ochranné kryty, štíty, umyvadla, vany, zubařské hmoty [11].

Polyamidy (PA) – pevný, houževnatý, odolný proti opotřebení. Vlastnosti neměnné do teploty 80 °C. Vyráběné polykondenzací slouží k výrobě ozubených kol, ložisek, v optice na výrobu brýlí. Důležitý význam mají polyamidová vlákna známá pod obchodním názvem silon, perlon, kapron, dederon [11].

Polytetrafluorethylen (PTFE) – teflon, plast s nižší povností, ale o vysoké houževnatosti je odolný proti všem chemikáliím, dobrý izolátor. Stálý v rozmezí teplot –250 °C až +250 °C. Těsnění, ucpávky hadice, izolace vodičů, v letecké a technice raketové technice. S uhlíkem a bronzem se užívají na nemazaná těsnění a kluzná ložiska [11].

2.2.2 Reaktoplasty

Fenolformaldehyd (PF) – fenolplast nebo fenolformaldehydová pryskyřice. Jeden z nejstarších využitelných plastů. Tvrdý, křehký a stálý do teploty 120 °C a má výborné elektroizolační vlastnosti. Užívá se na lisovací hmoty pod názvem např. bakelit, k výrobě elektroizolačních součástí, držadla žehliček [11].

Epoxidy (EP) – pevné, nenáchylné povětrnostním vlivům a chemickému prostředí. Využitelné v elektrotechnice, jako lepidla pro kovy, chemicky odolné podlahy, sportovní nářadí (laminátové lyže a tyče) [11].

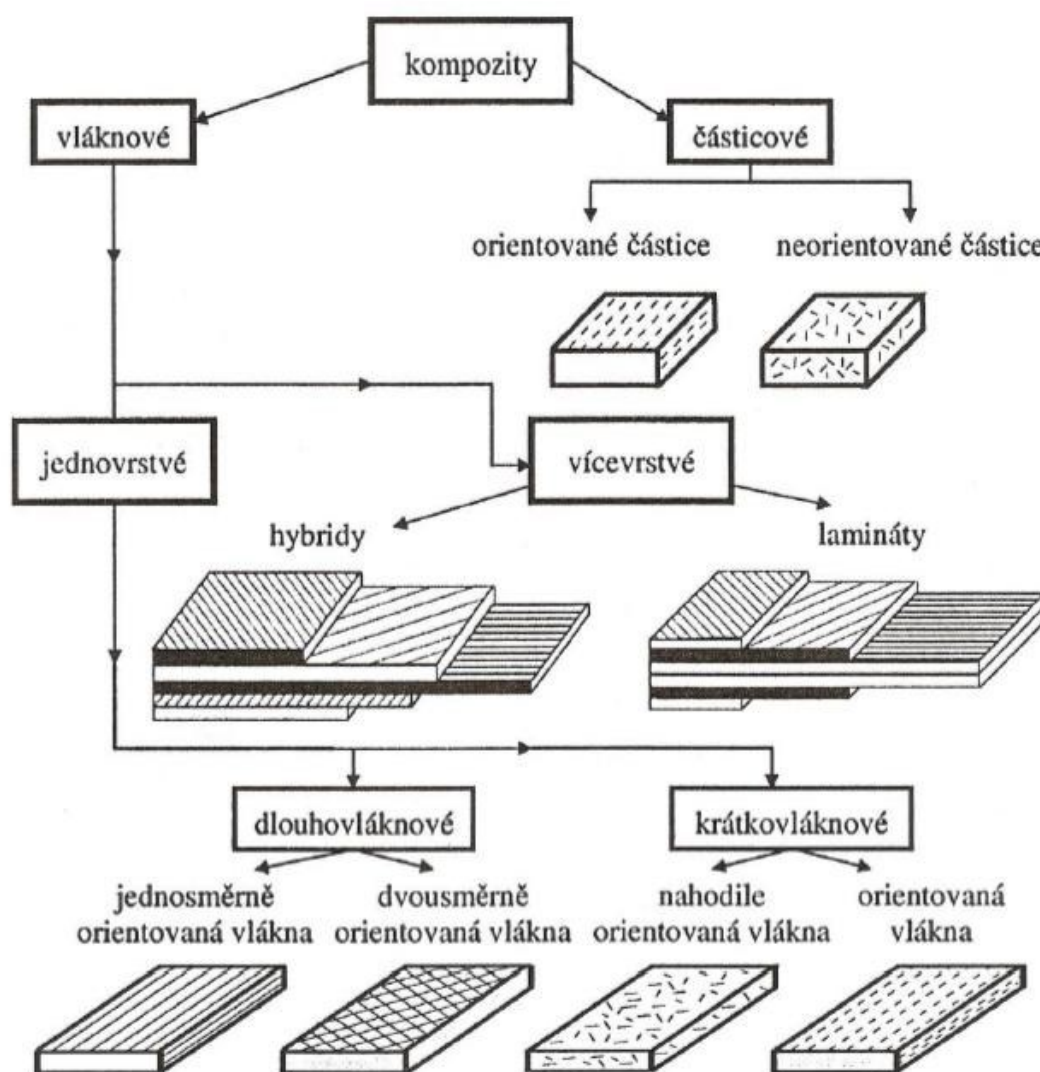
Polyestery (PES) – pojivem pro skleněná vlákna případně skleněné tkaniny. Výroba tzv. skleněných laminátů s pevností přes 250 MPa. Odolávají teplotám do 120 °C. Užívají se na výrobu karoserií, lodí, bazénů, střešní krytiny a další.[11].

Polyuretan (PUR) – tuhý kaučukovitý otěruvzdorný plast, má tlumící schopnost. Lehčený polyuretan těsnící pěny v chladiřnictví na tzv. izolační sendvičové panely, tmely, bezpečnostní obložení ve vozidlech [11].

Silikon (SI) – jsou organické sloučeniny křemíku s kyslíkem, odpuzují vodu a mají velkou odolnost proti stárnutí a odolnost proti teplotám až 200 °C. Vyrábí se z nich maziva pro letecký průmysl, tuhnou až při teplotě –70 °C, a jejich viskozita se téměř nemění ani při nízkých teplotách. Slouží pro výrobu hydraulických olejů, na izolace a teplem tvrditelné laky [11].

Kompozitní materiály

Rozdělení je zaměřeno na konkrétní zařazení kompozitů s uhlíkovými vlákny a slouží pro názornost a lepší pochopení vlastností materiálu použitého při experimentu.



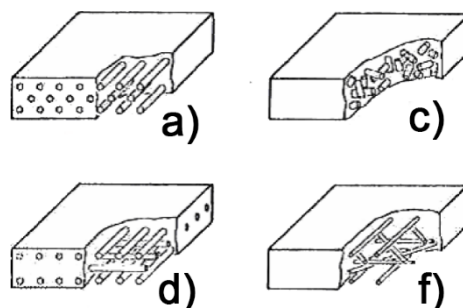
Obrázek 2.2 – Základní rozdělení kompozitních materiálů podle výztuže [16]

Podle tvaru disperze (výztuže) se dělí kompozity na:

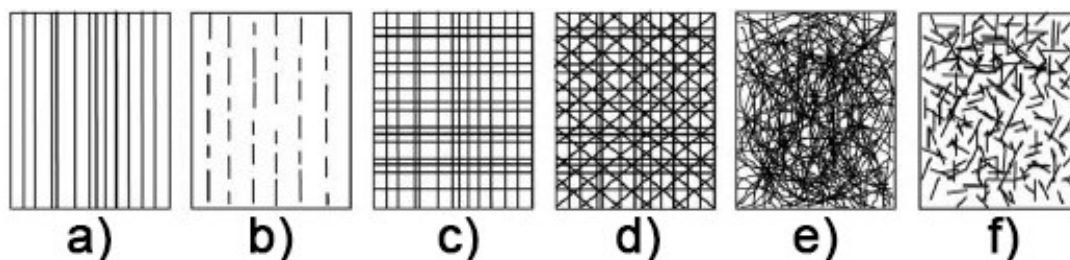
- **Vláknové** – polymerní kompozity obsahující vlákna. Ty mají veliký vliv na pevnost tvaru, tahu a ohybu. Je hodně typů vláken. Směr jejich uložení má dopad na tuhost a pevnost, přičemž ve směru vláken je pevnost nejvyšší a ve směru mimo orientaci vláken je pevnost nižší. Vláknové výztuže se dále dělí podle své délky na dlouhovláknou a krátkovláknou.
- **Částicové** – polymerní kompozity tvarované částicemi. Jeden rozměr útvaru výztuže nepřesahuje výrazně rozměry ostatní. Vytvuzující částice dále mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný. Významné jsou jejich termomechanické vlastnosti (teplotní roztažnost, tuhost).

Charakteristické typy vláken můžou být orientovány []:

- Dlouhá vlákna jednosměrně,
- krátká vlákna jednosměrně,
- dvousměrné vyztužení (plátno)
- vícesměrné vyztužení,
- náhodná orientace vláken
- náhodná orientace krátkých vláken

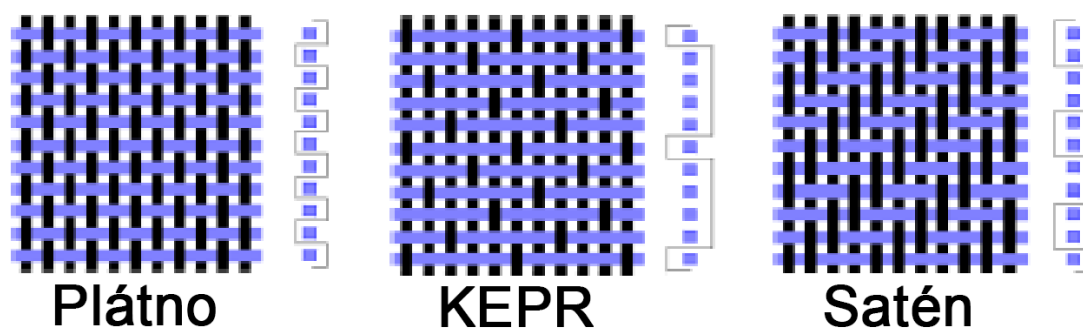


Obrázek 2.3 – Prostorové uspořádání [17]



Obrázek 2.4 – Typy vláknových kompozitů [18]

Dvousměrné vyztužení může mít následující tvary znázorněné na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5 – Druhy tkanin [19]

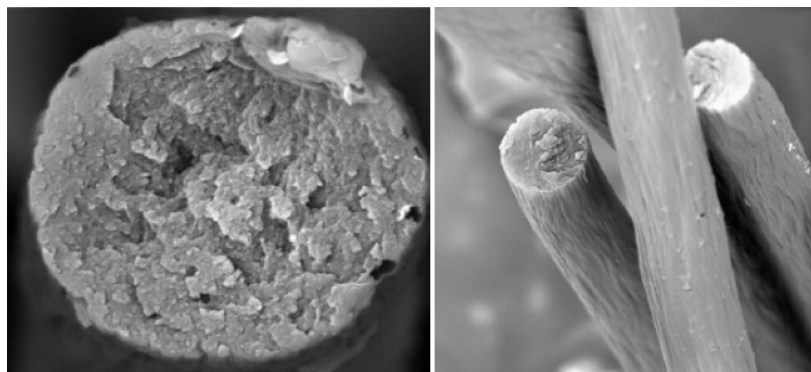
Podle typu materiálu výztuže rozlišujeme:

- Skelná,
- aramidová,
- keramická,
- polymerní,
- uhlíková,
- whiskery.

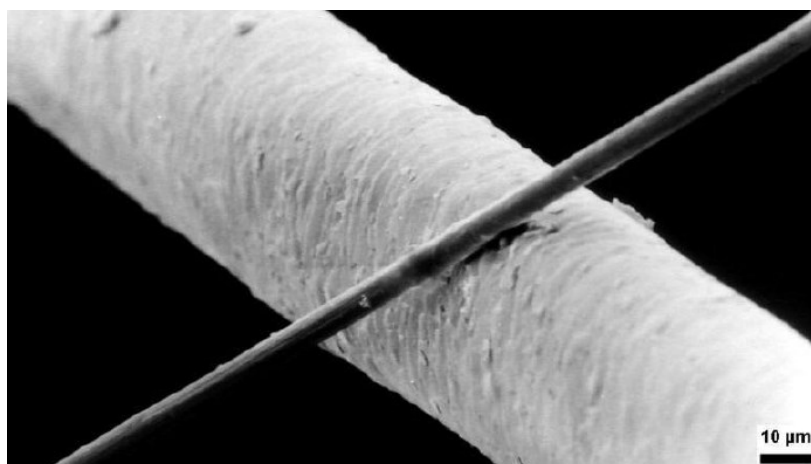
2.2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou většinou ta, která vzniknou při teplotě mezi 800 až 1600 °C. Z Jiného úhlu pohledu jsou vlákna považované za uhlíková, pokud mají obsah uhlíku do 92 % hmotnostních [20].

Vlákna jsou krystalická a podle technologie výroby se rozlišují dva typy uhlíkových vláken. Označení vláken ze smol tvoří písmeno P (pitch). Druhým typem jsou PAN vlákna.



Obrázek 2.6 – Struktura uhlíkového vlákna [21]



Obrázek 2.7 – Srovnání velikosti vlasu a uhlíkového vlákna (černá)[21]

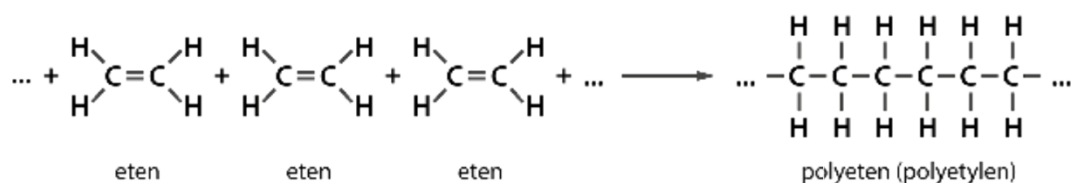
2.3 Výroba plastů a kompozitních materiálů

Plasty se v malém objemu produkují modifikací přírodních polymerů, na které se vážou chemicky nízkomolekulární sloučeniny.

Převažuje výroba syntetická, u které jsou hlavní suroviny ropa, uhlí, dusík, zemní plyn, aj. Ty se nadále přetváří v nízkomolekulární látky (monomery), které jsou podstatné k následné výrobě polymerních látek. K tomu dochází jen u sloučenin schopných chemicky reagovat s ostatními molekulami. Výrobní fáze se nazývá polyreakce (přeměna nízkomolekul na makromolekuly). Rozlišujeme čtyři typy těchto přeměn [11]:

Polymerace

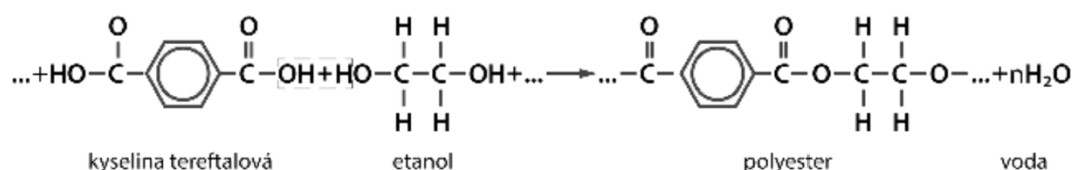
Polymer vznikne splynutím monomerů – nenasycených monomerních útvarů, které utvoří řetěz lineárních vazeb zrušením dvojné vazby. Výsledná chemická stavba polymeru je totožná s monomerem [11].



Obrázek 2.8 – Polymerace, vytvoření polyetylenu [11]

Polyadice

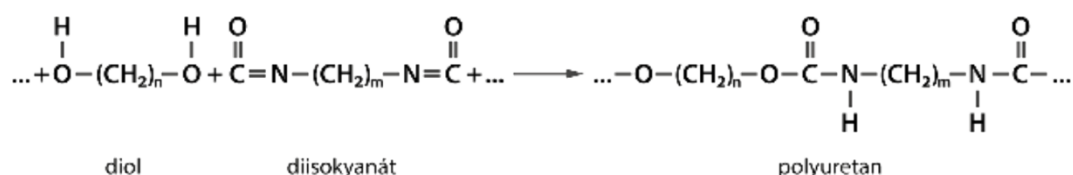
Lineární nebo prostorově zesíťované makromolekuly (polyadukty), vznikají ze stejných nebo z rozličných monomerů bez oddělení vnějších produktů. Do polyreakce vstupují monomery různého typu a výsledný polymer má úplně odlišnou chemickou stavbu [11].



Obrázek 2.9 – Polyadice, vznik polyesteru [11]

Polykondenzace

Molekuly vytvoří oddělením nízkomolekulární látky makromolekuly (polykondenzáty). Do procesu opět vstupují různé monomery a při reakci se odštěpují nízkomolekulární reakční zplodiny jako voda, čpavek, alkohol a jiné. [11]



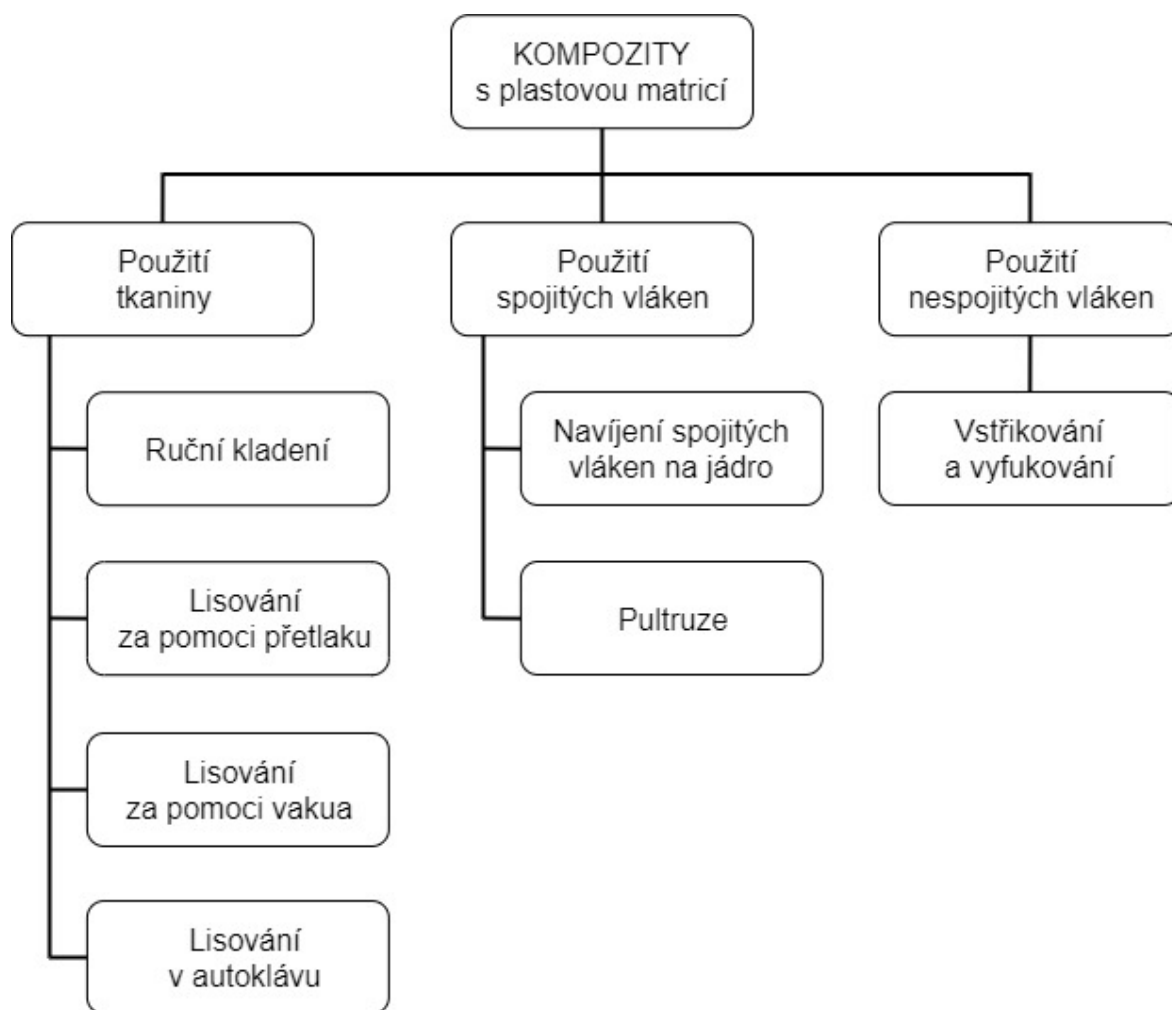
Obrázek 2.10 – Polykondenzace, vznik polyuretanu [11]

Smíšené polyrekreace

Výsledkem smíšených polyreakcí je zesíťovaný polymer, jenž vznikl reakcí mezi monomery, které mají tři nebo více vazebných míst. Zvláštním druhem je kopolymerace, tj. pravidelné spojování dvou nebo tří monomerů do jednoho řetězce. Výsledný plast je tzv. kopolymer [11].

Kompozitní materiály – existuje mnoho technologií jejich výroby. Hlavními parametry odlišující jednotlivé způsoby výroby jsou procesy prosycování a následné vytvrzování matrice. Případně z jiného úhlu pohledu podle druhu formy na otevřenou a uzavřenou. Dalším možným způsobem, jak lze rozdělit výrobu kompozitů je podle skupenství matrice při aplikaci na výztuž. Jde o matrici v tuhém stavu a matrici ve stavu tekutém (tavenina, roztok).

Dalším rozdělením technologií pro výrobu kompozitních materiálů je podle toho, zda je výztuž ve formě krátkých, nebo spojitých vláken, či ve formě tkaniny. Jednotlivé technologie jsou zaznačeny na *obrázku 2.11*.



Obrázek 2.11 – příklad metod výroby kompozitů s plastovou matricí

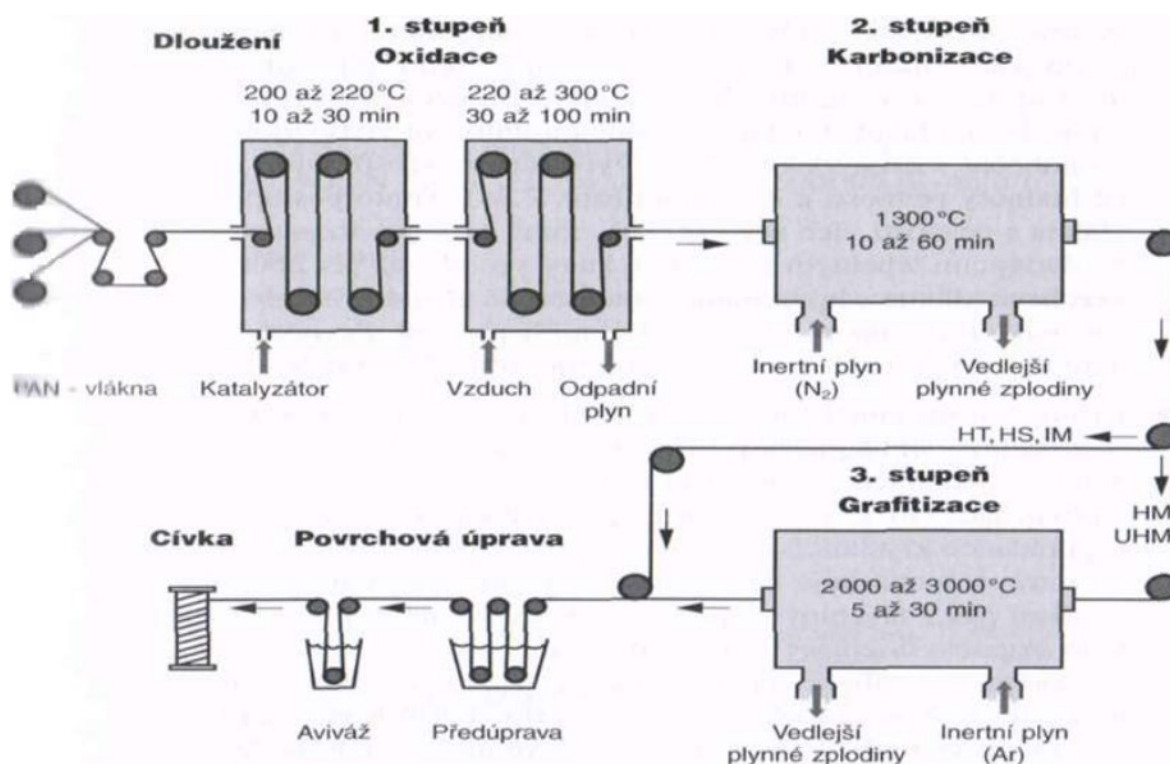
Výroba uhlíkových vláken

Tři základní suroviny používané pro výrobu uhlíkových vláken jsou polyakrylonitril (PAN), celulóza a smola. Nejčastěji se využívají vlákna, která jsou vyrobená z polyakrylonitrilu (PAN).

Samotná výroba se rozděluje do tří kroků. V prvním stupni dochází k dloužení polyakrylonitrilu pro docílení co největší orientace molekul ve směru osy vlákna. Vlákna se následně musí stabilizovat pomocí zahřívání při teplotě v rozmezí 200–300 °C pod mechanickým napětím za přítomnosti vzduchu. Následně se PAN dehydruje a přetváří na žebříčkový polymer [21].

V rámci druhého stupně se pomocí karbonizace přemění žebříčkový polymer na grafitickou strukturu, která probíhá za přibližné teploty 1600 °C. Tímto vzniknou vlákna o vysoké pevnosti, která může být vyšší než 5 000 N [21].

V posledním stupni proběhne ohřev vláken na teplotu 2000 až 3000 °C. Tím dosáhneme vyššího E-modulu vláken, který může být až 400 000 N, ale snižuje se pevnost vláken. Po dokončení tohoto procesu získáme standardní uhlíková vlákna, která mají pevnost až 3 500 N a E-modul 230 000 N. Na obrázku je znázorněno schéma výroby [21].



Obrázek 2.12 – Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN [21]

2.4 Vlastnosti kompozitních materiálů

Základní vlastnosti kompozitů [22]:

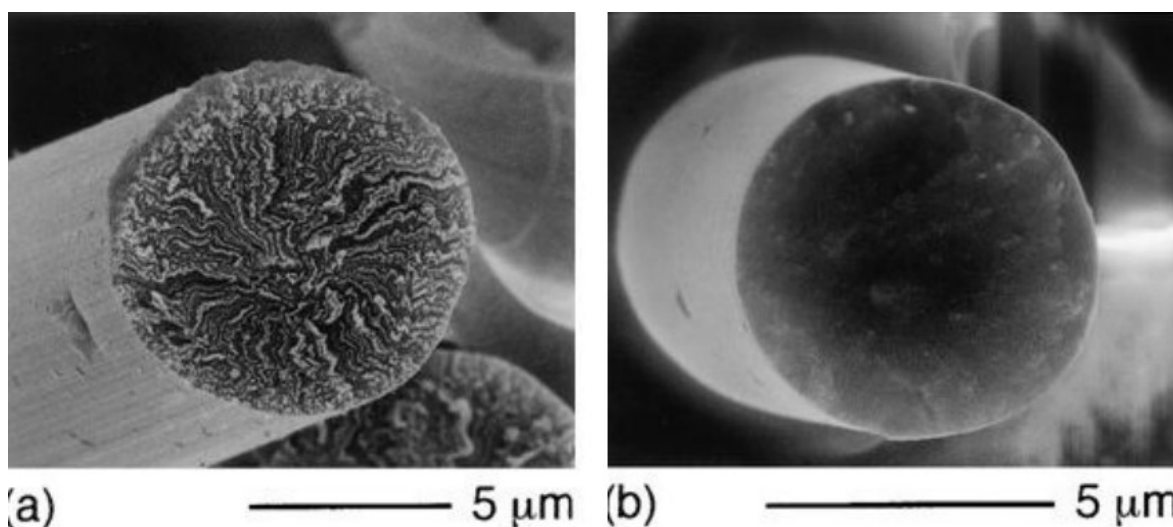
- Elektrická nevodivost,
- nulový útlum elektromagnetických vln,
- nízká tepelná vodivost,
- nízká měrná hmotnost,
- dobré mechanické vlastnosti,
- korozivzdornost,
- snadná montáž a údržba.

Uhlíkové vlákna rozdělena dle mechanických vlastností

Vlákna tvořena z uhlíku mohou vykazovat rozdílné hodnoty mechanických vlastností. Podle hodnot mechanických vlastností, tj. modulu pružnosti E a pevnosti v tahu R , se uhlíková vlákna dělí do následujících skupin [23, 24]:

- HS (High Strength) s vysokou pevností ($R > 3000$ MPa),
- UHS (Ultra-High Strength) s ultra vysokou pevností ($R = 2000\text{--}3000$ MPa),
- HM (High Modulus) s vysokým modulem pružnosti ($E = 300$ GPa),
- UHM (Ultra-High Modulus) s ultra vysokým modulem pružnosti ($E > 450$ GPa).

Odlišnost struktury lze vidět na obrázku 2.13.



Obrázek 2.13 – Porovnání struktury [24]

a) Vysokomodulová struktura,

b) vysokopevnostní struktura vlákna.

2.5 Obrábění kompozitních materiálů

Obrábění kompozitních materiálů se od konvenčního obrábění kovů liší značným způsobem. Je pochopitelné, že obrobitelnost různých druhů kompozitů je hodně rozdílná.

Problematika při obrábění uhlíkových kompozitních materiálů:

- Nedobrá tepelná vodivost, tudíž větší tepelné namáhání nástroje i obrobku,
- vysoká abrazivnost uhlíkových vláken i matrice obrobku má určitý vliv na životnost nástroje,
- velikost řezných sil s ohledem na tenkostěnnost, vrstevnatost a štíhlost obrobku.

2.5.1 Technologie frézování

Frézování je jednou z nejvíce rozšířených metod obrábění. Jeho hlavní předností je docela velká výkonnost při velmi dobré kvalitě obrábění. Frézování se využívá pro obrábění rovinných, tvarových i rotačních ploch, pro obrábění drážek všelijakých profilů i pro obrábění závitů a ozubení [25].

Při frézování se materiál obrobku odebírá břity nástroje (frézy), které se otáčí. Posuv často koná součást a převážně se jedná o směr kolmo na osu nástroje. Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky [25].

U sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří vycházejícím zubem ze záběru [25].

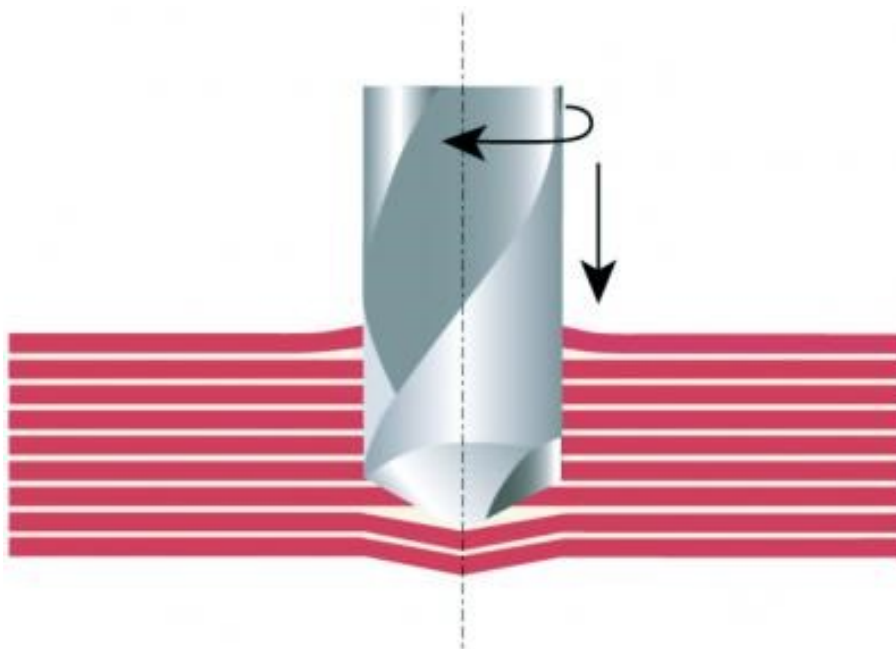
Naopak je tomu u nesousledném frézování, kde smysl rotace nástroje je proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. K oddělování třísky nedochází v okamžiku její minimální tloušťky, ale po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem [25].

2.5.2 Teplo při frézování kompozitů

Jelikož se jedná o obrábění kompozitních materiálů je velký problém s odvodem tepla z místa řezu. Je to zapříčiněno převážně z důvodu matrice, které mají hodně nízkou tepelnou vodivost.

2.5.3 Delaminace

Delaminace je dalším velkým problémem při obrábění kompozitů. Nejčastěji se objevují u vrtání nebo frézování vrstvených kompozitních materiálů. Delaminace se tvoří u vstupu nástroje do materiálu i na jeho výstupu. Ukázka tvoření delaminace je pro lepší představu na *obrázku 2.14* [26].



Obrázek 2.14 – Názorný příklad delaminace při vrtání [26]

Často vzniká delaminace ve dvou fázích. V první fázi se jedná o časový úsek, kdy síla způsobená příčným ostřím tlačí na neobrobenou plochu materiálu, než dosáhne kritické hodnoty. Krajní hranicí fáze je proniknutí ostří skrze materiál [26].

Druhá fáze má za následek rozvíjení delaminace, způsobené tlakem nástroje. Delaminace končí, potom co příčné ostří prostoupí na povrch. U vnitřních vrstev nemůže nastat z toho důvodu, že jsou drženy horní a spodní vrstvou [26].

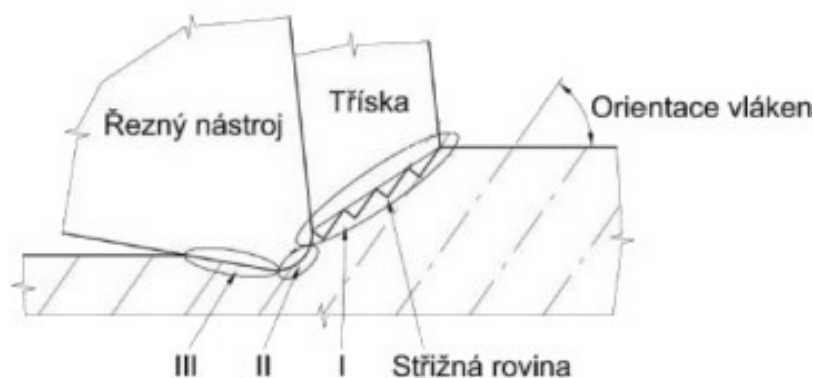
Značný vliv na delaminaci má především ostří nástroje, tudíž je důležité nástroj dostatečně často ostřit, popřípadě měnit VBD. Vlivem neostrosti nástroje se vlákna nestříhají, ale mají sklon k deformaci a vytahování z matrice [26].

2.6 Teorie tvorby třísky kompozitních materiálů

Tvorba třísky je jeden z hlavních problémů při obrábění kompozitních materiálů. U standartního obrábění jsou známy principy tvorby třísky, proto je možno vycházet ze zkušeností při výběru rezných podmínek [27].

Ovšem u kompozitních materiálů je ještě tvorba třísky poněkud neprobádána, tudíž souhrn těchto zkušeností je malý. Konkrétní neznalost rozsáhlých vlastností jednotlivých konvenčních materiálů i s doporučenými reznými podmínkami. Nutí firmy k testování a zavádění vlastních metod, což má za následek dělání převážně soukromých výzkumů jejichž výsledky nejsou veřejně dostupné (duševního vlastnictví) [27].

Základní předpoklad tvorby třísky je hodnocen při ortogonálním řezu. Tento mechanismus tvorby třísky je znázorněn na *obrázku 2.15* [27].



Obrázek 2.15 – Základní oblasti tvorby třísky [27]

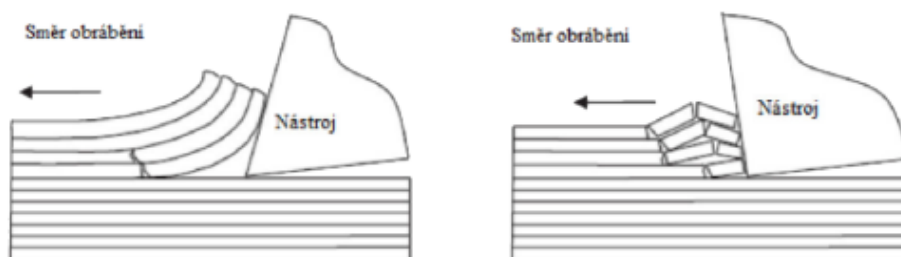
- Oblast I: Vlastní separace třísky od materiálu. Vznik trhlin vlivem zatížení nástroje na vlákna. Šíření trhlin směřuje kolmo na osu vyztužujících vláken.
- Oblast II: V důsledku radiusu zaoblení břitu se nevytváří povrch obráběním, nýbrž v první řadě tvářením. Vlákná a matrice jsou zatlačována pod břit.
- Oblast III: Dopad pružných deformací má za následek, že po odlehčení obráběné vrstvy se část vrchní (povrchové) vrstvy vrací zpět.

Vysoká křehkost vyztužujících vláken vyvolává charakteristický křehký lom. Na obrázku 2.15 je znázorněn křehký lom skleněných vláken. Lom podněcuje vznik trhlin a defektů, kde se shromažďuje napětí. To má za následek vznik a růst trhlin [27].

Velkou roli u obrábění kompozitních materiálů má úhel čela, stejně jako u klasického obrábění. Jsou známi dva zásadní druhy oddělování těchto materiálů. Na *obrázku 2.16* jsou vyobrazeny oba způsoby oddělování třísky (typu I a typ II).

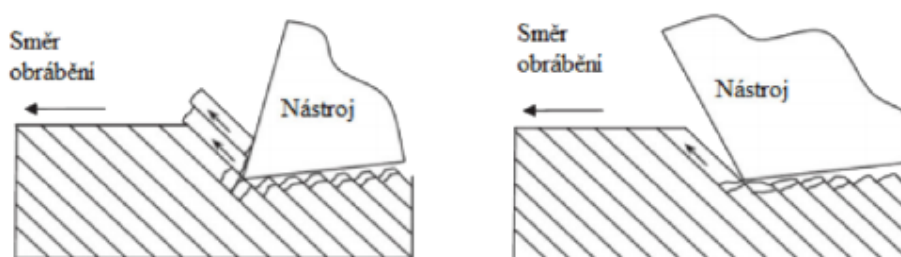
Typ I vznik nastává použitím kladného úhlu čela při nulovém úhlu orientace vláken.

Typ II vznik při záporném úhlu čela, kdy se materiál porušuje vzpěrem [27].



Obrázek 2.16 – Způsob oddělování materiálu typ I nalevo a typ II napravo [27]

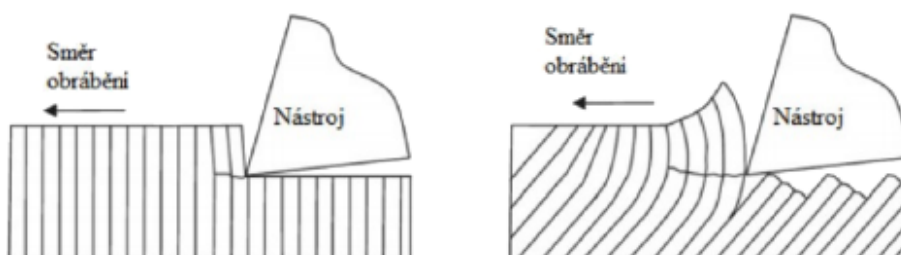
Jestliže je orientace vláken v rozmezí $0-90^\circ$, začínou se jednotlivá vlákna odlamovat zvlášť. Toto tvrzení se týká kladného i záporného úhlu čela. Na obrázku 2.17 jsou znázorněny procesy řezání s orientací vláken 45° [27].



Obrázek 2.17 – Způsob oddělení materiálu při orientaci vláken rovno 45° [27]

Při obrábění kladným úhlem čela dochází k oddělování materiálu stříhem za předpokladu, že má orientaci vláken rovno 90° . Za těchto podmínek nedochází k výraznému lámání (vlákna pod rovinou řezu nejsou výrazně porušována) [27].

Pokud má obráběný kompozitní materiál orientaci vláken větší než 90° , nastává deformace vláken způsobena nástrojem. To má za následek delaminaci a interlaminární deformaci. Řezaná část nástroje se ohýbá a působí na následující vrstvy. Ty jsou tímto poškozeny ještě před samotným vniknutím nástroje. To celé způsobuje poškození vláken a matrice pod rovinou řezu. Tvoří se výrazně větší třísky. Celkově se jedná o přístup, který není příliš vhodný. Mezi nejvýhodnější uspořádání vláken pro obrábění je jejich uspořádání pod úhlem 135° . Vlákna jsou odstříhována po svazcích, jsou namáhána na ohyb a tah. Předpoklad této situace vyžaduje dostatečnou adhezi vláken a matrice [27].



Obrázek 2.18 – Oddělování materiálu nalevo vláken s orientací rovno 90° a napravo 135° [27]

3 VLASTNÍ NÁVRH VHODNÝCH ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Kompozity s matricí na bázi pryskyřice nebo polymeru spadají do skupiny materiálů s určitými charakteristickými znaky, jejichž aplikace spolu s nároky na nástroje se neustále zvyšuje. Obrábění kompozitních materiálů je obtížné a návrh vhodných řezných nástrojů si žádá obvykle selektivní postup a značnou pečlivost. Mezi nejpoužívanější obráběcí operace zpracovávající tyto materiály se řadí řezání (dělení), soustružení, frézování a zejména vrtání [28].

3.1 Klasifikace výběru nástrojů pro obrábění kompozitů

Obráběné kompozity nejvíce obsahují vlákna uhlíková, skelná nebo aramidová, která jsou vázána organickým polymerem, epoxidovou nebo fenolovou pryskyřicí.

Vzájemným sloučením matrice a vyztužujících vláken se docílí odlišných mechanických vlastností, které je potřeba vzít v úvahu při návrhu řezného nástroje. Kdežto kompozity zpevněné uhlíkovými vlákny jsou velmi abrazivní, proto je požadován co nejvíce odolný nástrojový materiál. Vzhledem k tomu byly vyvinuty specifické nástroje, které vlákno nejdříve předeponou a následně čistě oddělí a odstraní z pracovního prostoru [28].

Zásadní význam s ohledem na kvalitu obrábění kompozitů mají mimo samotného nástroje i řezné podmínky. Závisí na dobře zvoleném posuvu, na otáčkách a na zaručení perfektního řezu, to znamená na zamezení tření nástroje o povrch obrobku. Neřeže-li nástroj správně, dochází k delaminaci materiálu nebo k lomu vláken [28].

3.1.1 Řezné materiály

Uhlíková vyztužující vlákna jsou velice abrazivní. Proto je nutné vybírat z vysoko oteruvzdorných nástrojových materiálů, jenž společně se správnou geometrií sehrává hlavní úlohu. Nástroje musí disponovat pozitivní geometrií a velmi ostrým břitem, aby nedocházelo k třepení nebo delaminaci obráběné plochy.

Z finančního pohledu se při posuzování řezných materiálů dosti často vychází z jejich řezivosti. Snahou je aplikovat materiály s dlouhou trvanlivostí za přijatelné kvality obrobku. U kompozitních materiálů je nutné, aby požadovaný nástroj splňoval více předpokladů. Především houževnatost, pevnost za vysokých teplot a odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Pro tento případ je vhodné použít řezný materiál jako je slinutý karbid a polykrystalický diamant [29].

Slinutý karbid (SK)

Nástroje ze slinutých karbidů dosahují lepších výsledných parametrů v porovnání s nástroji vyrobenými z rychlořezné oceli. Mechanické vlastnosti SK záleží hlavně na obsahu pojiva (nejčastěji Co – kobalt) a velikosti zrna a druh karbidické fáze [30].

Tvrdost nástrojového materiálu se zvětšuje s narůstajícím podílem a jemnějším zrnem karbidické fáze. Pro vyztužené kompozity abrazivními vlákny (uhlíkovými, skelnými) je nejvhodnější jemnozrný slinutý karbid se zrnitostí menší než $0,7\text{ }\mu\text{m}$, s vysokou tvrdostí a zároveň co největší ohybovou pevností. Díky tomu lépe odolávají opotřebení [21].

K dosažení větší trvanlivosti jsou nástroje pokryty různými druhy povlaků na bázi karbidů, nitridů, oxidů nebo diamantu. Dvě nejvýhodnější metody povlakování jsou PVD (Physical Vapour Deposition) – fyzikální napařování a CVD (Chemical Vapour Deposition) – chemické napařování z plynné fáze [21].

U metody PVD se často používají povlaky nitridu hliníku, nitridu chrómu a nitridu titanu. Metoda CVD využívá diamantové povlaky PKD. Ty mohou dosahovat zhruba až třikrát větší tvrdosti [21].

Polykrystalický diamant (PKD)

Jde o umělý polykrystalický diamant a je jedním z nejtvrdějších materiálů. Vzniká lisováním za vysokých teplot a tlaku s přidáním minimálního množství kovového pojiva. Z ekonomického hlediska se vyrábí výhradně jenom menší řezné segmenty, které se připájí na podklad slinutého karbidu [23].

Nástroje jsou produkovány se zrny o velikosti 2 až $30\text{ }\mu\text{m}$. Čím větší je zrno, tím větší je tvrdost případně lomová houževnatost. Na druhou stranu jemná zrna zajišťují lepší odolnost proti otěru a dosažení velmi ostré hrany ostří. Nástroje z tohoto materiálu právě disponují vysokou tvrdostí (příznivě odolávají abrazivnímu působení vláken) a bezvadnou tepelnou vodivostí s nízkým koeficientem tření (ta zajišťuje rychlé odvedení tepla z místa řezu). Vysoká kvalita obrobeného povrchu a dlouhá trvanlivost nástroje jsou podmíněny výše uvedenými vlastnostmi [21].

Za ideálních záběrových a řezných podmínek je trvanlivost mnohem vyšší než u nástrojů vyrobených ze slinutých karbidů. Ostrý břit, snižuje tvoření delaminace z toho důvodu, že u zvětšeného opotřebení břitu se vlákna spíše odlamují namísto toho, aby byla běžně řezána.

Vhodná řezná rychlost u nástrojů z tohoto materiálu je 200 až 1000 m/min a pracovní teplota nástroje nesmí přesáhnout $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, protože při teplotě $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ se mění diamant na grafit [23].

3.1.2 Řezné podmínky

U kompozitů je určení řezných podmínek obtížnější než například pro obrábění oceli. Je třeba předcházet vzniku vysokých teplot. Při vyšších teplotách by mohlo dojít k narušení matrice. Rovněž je důležité zajistit optimální řezné rychlosti, aby nedocházelo k vytrhávání vláken.

3.1.3 Opotřebení řezného nástroje

Při obrábění se tvoří na každém nástroji nějaký druh opotřebení. Vzniká vzhledem k pohybu nástroje vůči obrobku a nástroje vůči třísce. Opotřebení je komplikovaný děj podléhající mnoha faktorům. Jde jednoduše řečeno o souhru mechanického, tepelného a chemického namáhání nástroje. Je známo několik typů opotřebení.

Princip opotřebení se rozděluje hlavně do dvou typů, a to do mechanického a chemického. U mechanického opotřebení vznikají deformace způsobené odcházející třískou a třením po obrobku. K chemickému opotřebení dochází působením změny složení materiálu nástroje v místě řezu, čímž se zásadně mění mechanické vlastnosti povrchu obráběného materiálu. Děje opotřebení se dělí do čtyř následujících druhů:

- **Abraze** – brusný otěr mikročástic uvolněných z obrobku nebo nástroje,
- **adheze** – plastická deformace v místě styku nástroje a obrobku,
- **difuze** – migrace atomů z obrobku do nástroje a opačně,
- **oxidace** – vznik oxidů.

Prohlášení

Uvedený experiment nemohl být proveden za osobní účasti s ohledem na opatření souvisejícím s COVID-19. Tudíž jsou v diskuzi experimentu aplikovány a zpracovány předaná data získané ve spolupráci s firmou Dormer Pramet s. r. o.

4 DISKUZE EXPERIMENTŮ

Základním principem provedeného experimentu je obrábění konkrétně frézování uhlíkového kompozitního materiálu různými frézami od firmy SECO. Na základě získaných hodnot jsou výsledkem tohoto experimentu doporučené nejvhodnější nástroje vzhledem k různým požadavkům (typům) zákazníka.

4.1 Průběh uskutečněného experimentu

Výběr, nebo-li doporučení nejlepších nástrojů pro různorodé požadavky kupujícího bylo provedeno dle naměřených řezných sil a drsností povrchu určující kvalitu obrobených ploch, případně přesností dodržení požadované konečné šířky drážky.

U obráběného materiálu v tomto případě uhlíkového kompozitu bylo nejdříve uskutečněno frézování kontury a následně frézování drážky.

Při frézování kontury i drážky byly řezné podmínky stejné jen s tím rozdílem, že u frézování kontury byla hloubka řezu a_p rovna 2,4 mm a hloubka řezu a_p u frézování drážky byla rovno 1,25 mm. Další rozdílná proměnná byla šířka záběru a_e rovna 2,4 mm u frézování kontury a 6 mm u frézování drážky. Veškeré testované nástroje měli v průběhu experimentu tyto řezné podmínky konstantní.

Nakonec byly postupně naměřeny a následně vyhodnoceny složky řezných sil, drsnosti a šířky drážky.

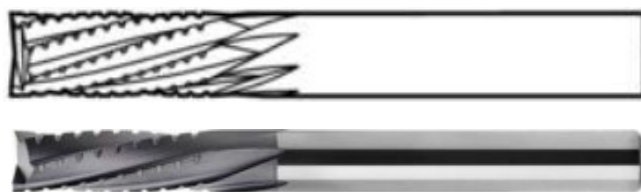
4.2 Testované nástroje

Řada Composite společnosti SECO má kompaktní produktovou řadu monolitních karbidových čelních fréz nesoucí označení JC, která zahrnuje různé geometrie a nástroje s i bez diamantového povlaku (DURA). Jsou vhodné pro obrábění kompozitních materiálů vyztužených skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Tato produktová řada také disponuje nástroji optimalizovanými pro obtížné řezné podmínky v náročných materiálech obrobků. Všechny tyto řezné nástroje jsou k dispozici pouze s válcovými stopkami [30].

Veškeré nástroje použité v experimentu pochází od výrobce SECO, vybrané právě z produktové řady JC. Jelikož se jedná o frézování kompozitu mají téměř všechny zvolené nástroje řeznou hranu 90° kromě frézy typové řady JC880. Ta má velmi malé řezné zaoblení hrany (0,2 mm).

K otestování byly využity postupně čtyři nástroje, které mají stejný obráběcí průměr. Frézy jsou vybaveny třemi odlišnými geometriemi zajišťující rychlé a účinné obrábění takovýchto materiálů obrobků, jako jsou kompozity s uhlíkovým a skleněným vláknem nebo uhlíkové kompozity (CRFP). Všechny tři geometrie jsou vybaveny speciální pokročilou konstrukcí, aby při obrábění docházelo k co nejmenšímu možnému poškození kompozitních materiálů obrobků. Díky tomu bylo proveditelné udělat čistý, řízený řez a zajistit tak co nejlepší kvalitu povrchu.

4.2.1 Typová řada nástroje JC860



Obrázek 4.1 – Fréza typové řady JC860 s povlakem DURA [31]

Tabulka 4.1 – Specifikace monolitní karbidové frézy řady JC860 (DURA) [31]

Výrobce		Obchodní označení
SECO		860060Z5.0-DURA
Popis	Jednotka	Hodnota
Obráběcí průměr	[mm]	6
Celková délka	[mm]	70
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu	[mm]	18
Úhel šroubovice břitů	[°]	-15
Úhel čela	[°]	0
Počet obvodových břitů	[-]	5
Materiál		Slinutý karbid
Povlak břitů		DURA
Cena za jeden kus	[Kč]	3 765

4.2.2 Typová řada nástroje JC870



Obrázek 4.2 – Fréza typové řady JC870 s povlakem DURA [32]

Tabulka 4.2 – Specifikace monolitní karbidové frézy řady JC870 (DURA) [32]

Výrobce		Obchodní označení
SECO		870060.0-DURA
Popis	Jednotka	Hodnota
Obráběcí průměr	[mm]	6
Celková délka	[mm]	65
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu	[mm]	18
Úhel šroubovice břitů	[°]	25/-25
Úhel čela	[°]	7
Počet obvodových břitů	[-]	2
Materiál		Slinutý karbid
Povlak břitů		DURA
Cena za jeden kus	[Kč]	2 782

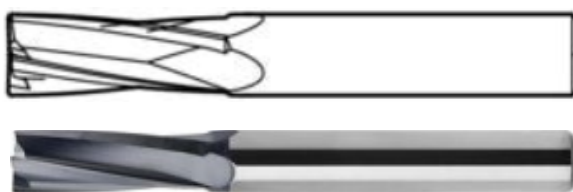


Obrázek 4.3 – Fréza typové řady JC870 bez povlaku [33]

Tabulka 4.3 – Specifikace monolitní karbidové frézy řady JC870 (bez povlaku) [33]

Výrobce		Obchodní označení
SECO		870060.0
Popis	Jednotka	Hodnota
Obráběcí průměr	[mm]	6
Celková délka	[mm]	65
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu	[mm]	18
Úhel šroubovice břitů	[°]	25/-25
Úhel čela	[°]	7
Počet obvodových břitů	[-]	2
Materiál		Slinutý karbid
Povlak břitů		Bez povlaku
Cena za jeden kus	[Kč]	1 014

4.2.3 Typová řada nástroje JC880



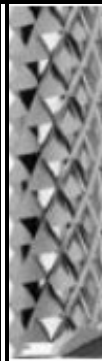

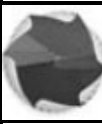



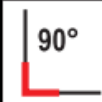
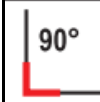
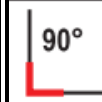

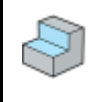
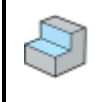
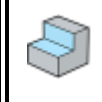
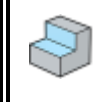
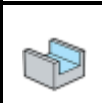
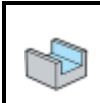
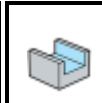
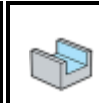


Obrázek 4.4 – Fréza typové řady JC880 s povlakem DURA [34]

Tabulka 4.4 – Specifikace monolitní karbidové frézy řady JC880 (DURA) [34]

Výrobce		Obchodní označení
SECO		880060R020Z4.0-DURA
Popis	Jednotka	Hodnota
Obráběcí průměr	[mm]	6
Celková délka	[mm]	65
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu	[mm]	18
Úhel šroubovice břitů	[°]	10
Úhel čela	[°]	6
Počet obvodových břitů	[–]	4
Rohový rádius	[mm]	0,2
Materiál		Slinutý karbid
Povlak břitů		DURA
Cena za jeden kus	[Kč]	3 280

Tabulka 4.5 – Porovnání parametrů testovaných nástrojů

					
					
Nástrojová řada	JC860	JC870	JC870	JC880	
Tvar čela frézy					
Operace					
					
Obráběcí průměr	[mm]	6	6	6	6
Celková délka	[mm]	70	65	65	65
Max. hloubka řezu v boč. směru posuvu	[mm]	18	18	18	18
Úhel šroubovice břitů	[°]	-15	25/-25	25/-25	10
Úhel čela	[°]	0	7	7	6
Počet obvodových břitů	[-]	5	2	2	4
Rohový rádius	[mm]	—	—	—	0,2
Materiál		SK	SK	SK	SK
Povlak břitů		DURA	DURA	DURA	DURA
Cena za jeden kus	[Kč]	3 765	2 782	1 014	3 280

4.3 Charakteristika obrobeného materiálu

Byl použit uhlíkový kompozit složený z:

- Epoxidové pryskyřice Havel L285,
- uhlíkové tkaniny CC200 KORDCARBON, gramáž 200g/m² s vazbou kepr.
- vlákna – Carbon HS 3K 200 tex.

HS (High Strength) – vysoká pevnost ($R > 3000$ MPa),

3K – pramenec tvořen z 3 000 primárních vláken

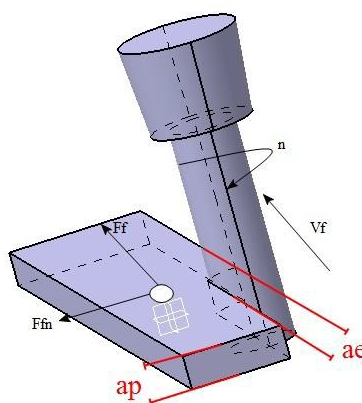
Tabulka 4.6 – Mechanické vlastnosti uhlíkového kompozitního materiálu

Popis	Jednotka	Hodnota
Modul pružnosti v tahu	E [GPa]	$43,3 \pm 5,59$
Pevnost v ohybu	[MPa]	$501 \pm 71,9$
Rázová houževnatost	a_{cu} [kJ·m ²]	$34,16 \pm 2,86$
Hustota	ρ [g·cm ⁻³]	1,2
Mez pevnosti v tahu	[MPa]	378 ± 51
Mez pevnosti v tlaku	[MPa]	5010 ± 730

4.4 Řezné podmínky

Během obrábění uhlíkového kompozitního materiálu byly použity stejné řezné podmínky pro frézování kontury i pro frézování drážky. Řezné podmínky byly při procesu frézování konstantní.

4.4.1 Frézování kontury



Obrázek 4.5 – Náčrt frézování kontury

kde je F_f – posuvová složka řezné síly [N]

F_{fn} – radiální složka posuvové síly [N]

a_e – šířka záběru [mm]

a_p – hloubka řezu [mm]

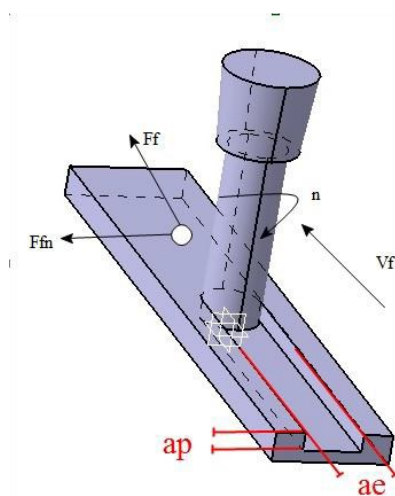
v_f – posuvová rychlost [mm/min]

n – otáčky [ot./min]

Tabulka 4.7 – Řezné podmínky při frézování kontury

Popis	Jednotka	Hodnota
Řezná rychlost	v_c [m/min]	100
Posuvová rychlost	v_f [mm/min]	550
Otáčky	n [ot./min]	5310
Šířka záběru	a_e [mm]	2,4
Hloubka řezu	a_p [mm]	2,4
Chlazení		bez chlazení

4.4.2 Frézování drážky



Obrázek 4.6 – Náčrt frézování drážky

kde je	F_f – posuvová složka řezné síly	[N]
	F_{fm} – radiální složka posuvové síly	[N]
	a_e – šířka záběru	[mm]
	a_p – hloubka řezu	[mm]
	v_f – posuvová rychlost	[mm/min]
	n – otáčky	[ot./min]

Tabulka 4.8 – Řezné podmínky při frézování drážky

Popis	Jednotka	Hodnota
Řezná rychlost	v_c [m/min]	100
Posuvová rychlost	v_f [mm/min]	550
Otáčky	n [ot./min]	5310
Šířka záběru	a_e [mm]	6
Hloubka řezu	a_p [mm]	1,25
Chlazení		bez chlazení

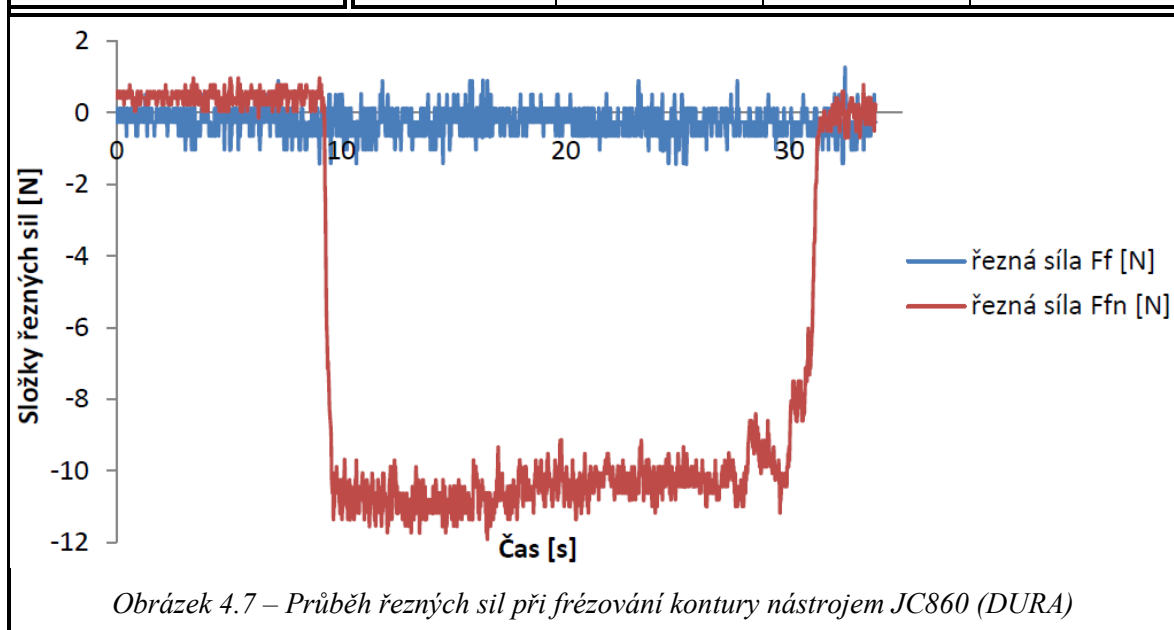
4.5 Naměřené hodnoty

V rámci experimentu byly naměřeny hodnoty drsností R_a a R_z , složky řezných sil a šířky drážky. Veškeré tyto hodnoty jsou zapsány pro konturu v tabulce 4.9 a pro drážku v tabulce 5.0

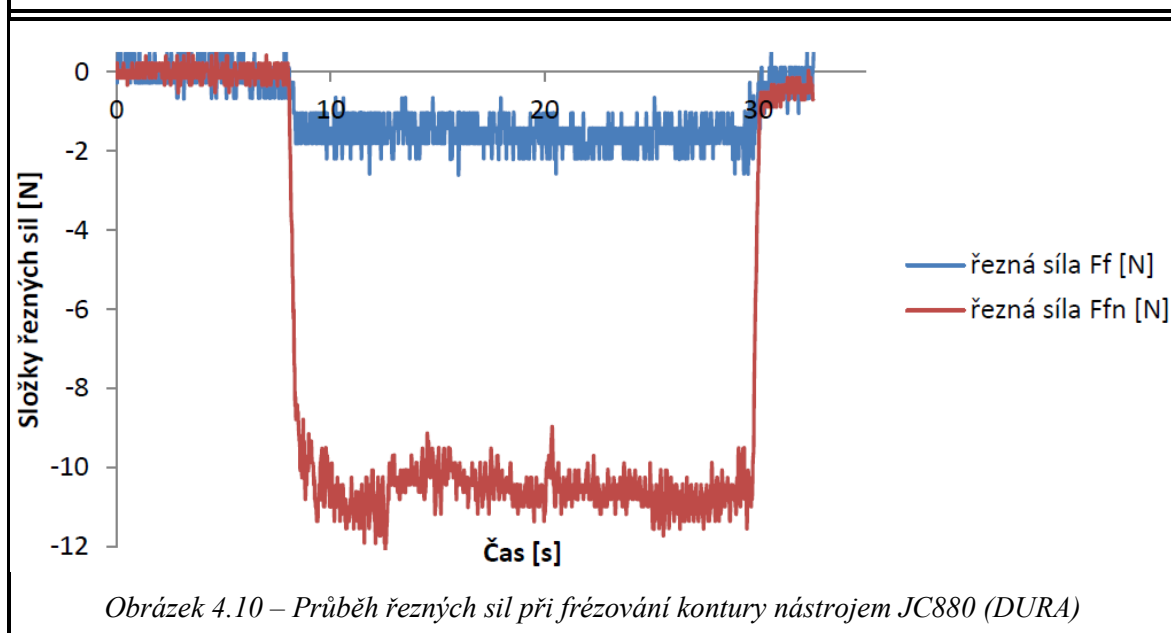
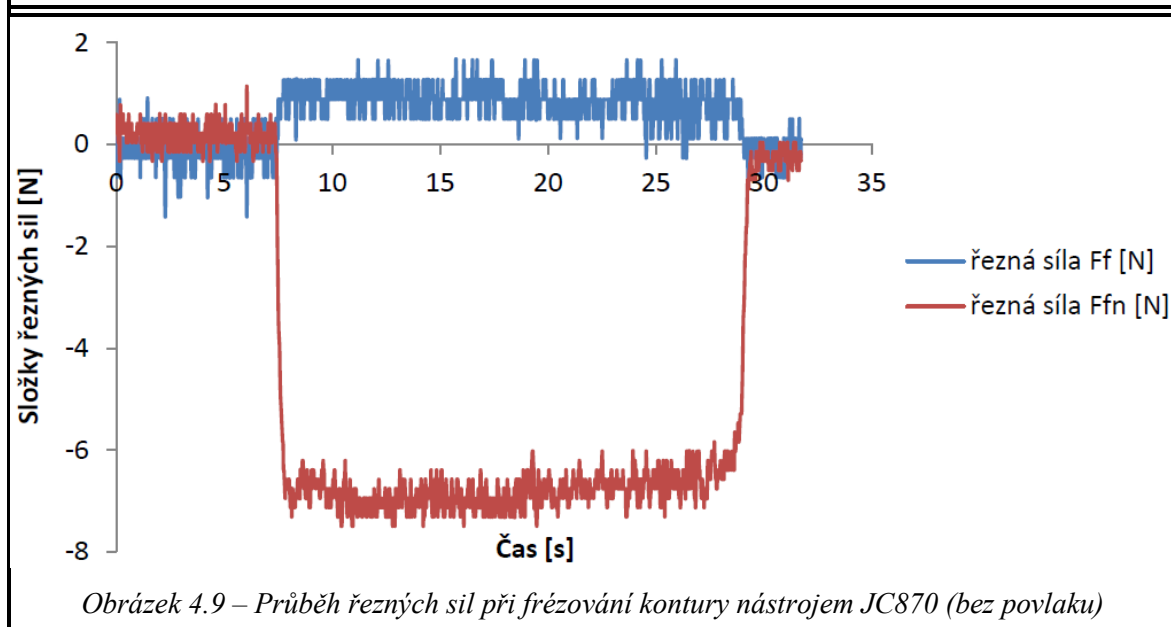
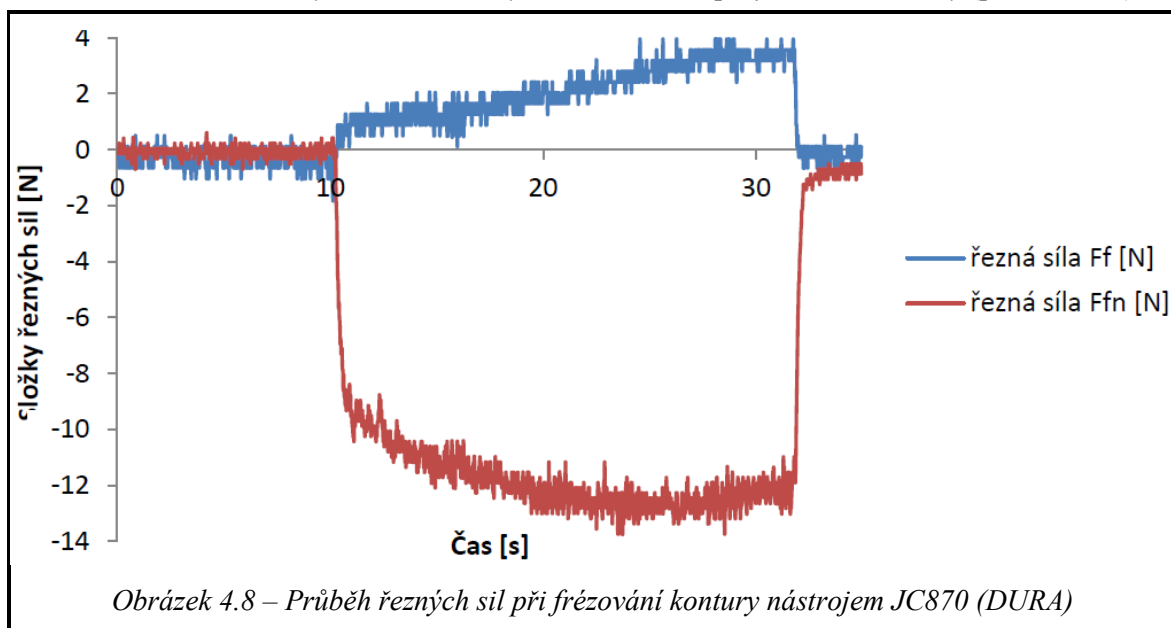
4.5.1 Frézování kontury

Tabulka 4.9 – Hodnoty drsností a řezných sil naměřené při frézování kontury

Typová řada nástroje	JC860	JC870a	JC870b	JC880
Naměřené hodnoty drsnosti povrchu				
R_a [mm]	$2,08 \pm 0,72$	$1,77 \pm 0,45$	$1,67 \pm 0,64$	$1,38 \pm 0,40$
R_z [μm]	$14,03 \pm 0,65$	$13,11 \pm 5,81$	$10,65 \pm 3,55$	$10,17 \pm 6,09$
Naměřené hodnoty řezných sil				
F_{tn} min./max. [N]	0,96/11,9	-12,09/0,22	-13,74/0,41	-7,49/0,41
F_f min./max. [N]	-1,42/0,88	-2,57/0,5	-1,80/3,95	-0,65/1,65



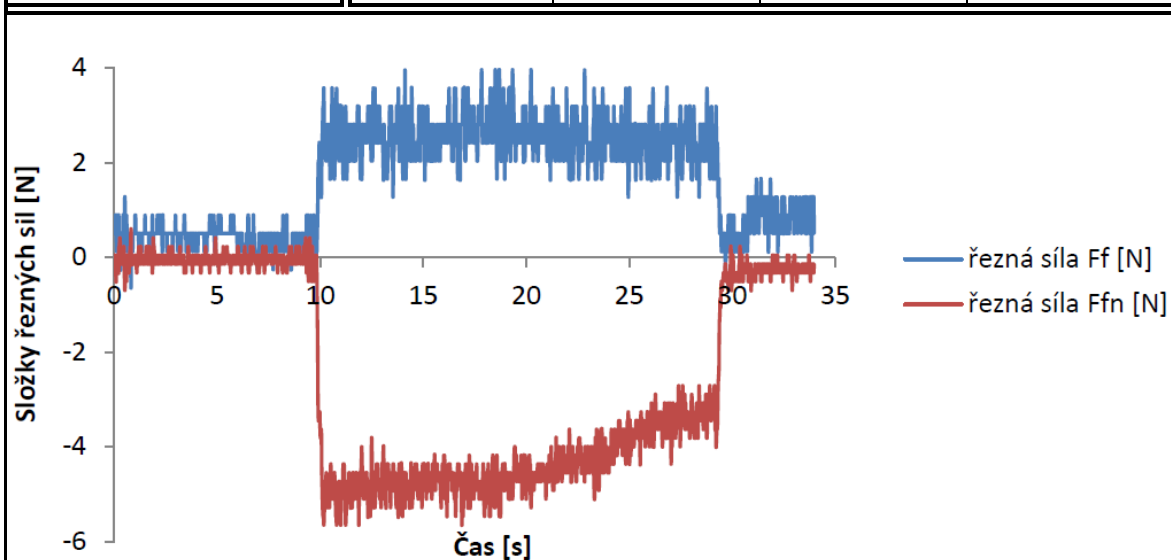
Tabulka 4.9 – Hodnoty drsností a řezných sil naměřené při frézování kontury (pokračování)



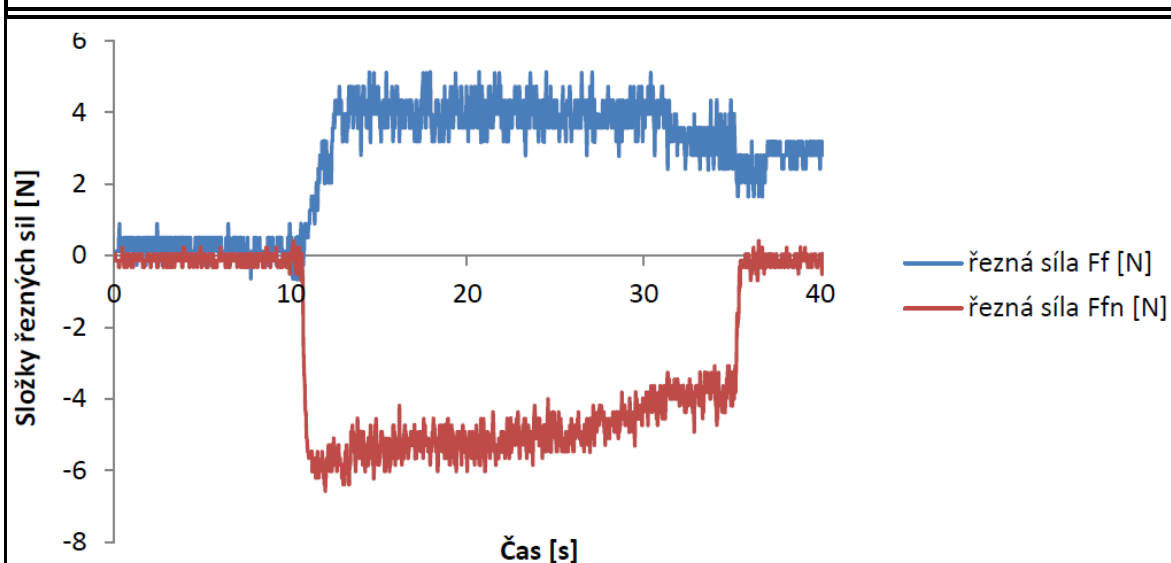
4.5.2 Frézování drážky

Tabulka 4.10 – Hodnoty šířek drážky, drsností a řezných sil naměřené při frézování drážky

Typová řada nástroje	JC 860	JC 870a	JC 870b	JC 880
Naměřené hodnoty šířek drážky				
Šířka drážky [mm]	$5,77 \pm 0,03$	$6,13 \pm 0,06$	$5,49 \pm 0,02$	$5,47 \pm 0,01$
Naměřené hodnoty drsnosti povrchu				
R_a [mm]	$2,88 \pm 0,72$	$1,71 \pm 0,35$	$1,77 \pm 0,24$	$1,59 \pm 0,42$
R_z [μm]	$15,57 \pm 3,79$	$10,13 \pm 2,53$	$11,27 \pm 2,42$	$10,71 \pm 2,91$
Naměřené hodnoty řezných sil				
F_{rn} min./max. [N]	-5,66/0,04	-10,98/0,22	-6,57/0,04	-4,37/0,41
F_r min./max. [N]	-0,27/3,95	-1,42/2,42	-0,27/5,10	-4,87/2,03

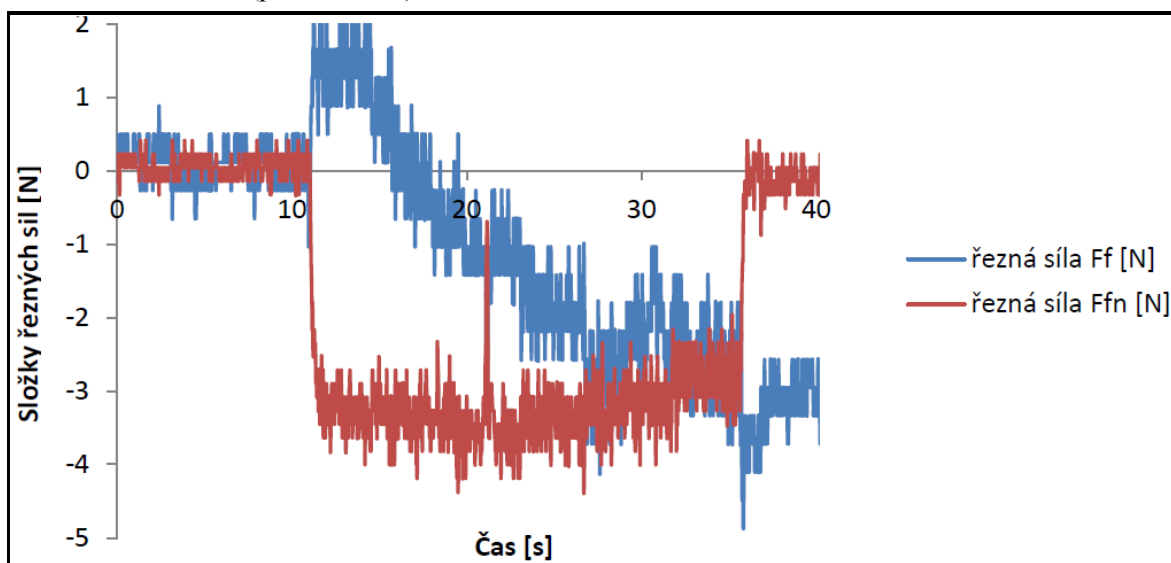


Obrázek 4.11 – Průběh řezných sil při frézování drážky nástrojem JC860 (DURA)

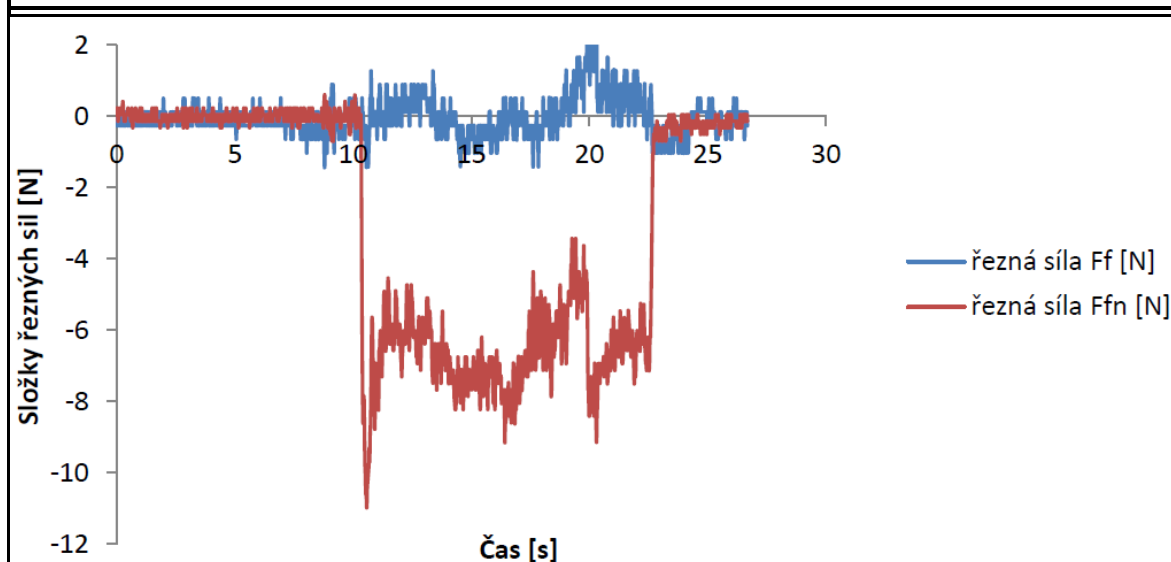


Obrázek 4.12 – Průběh řezných sil při frézování drážky nástrojem JC870 (DURA)

Tabulka 4.10 – Hodnoty šířek drážky, drsností a řezných sil naměřené při frézování drážky (pokračování)



Obrázek 4.13 – Průběh řezných sil při frézování drážky nástrojem JC870 (bez povlaku)

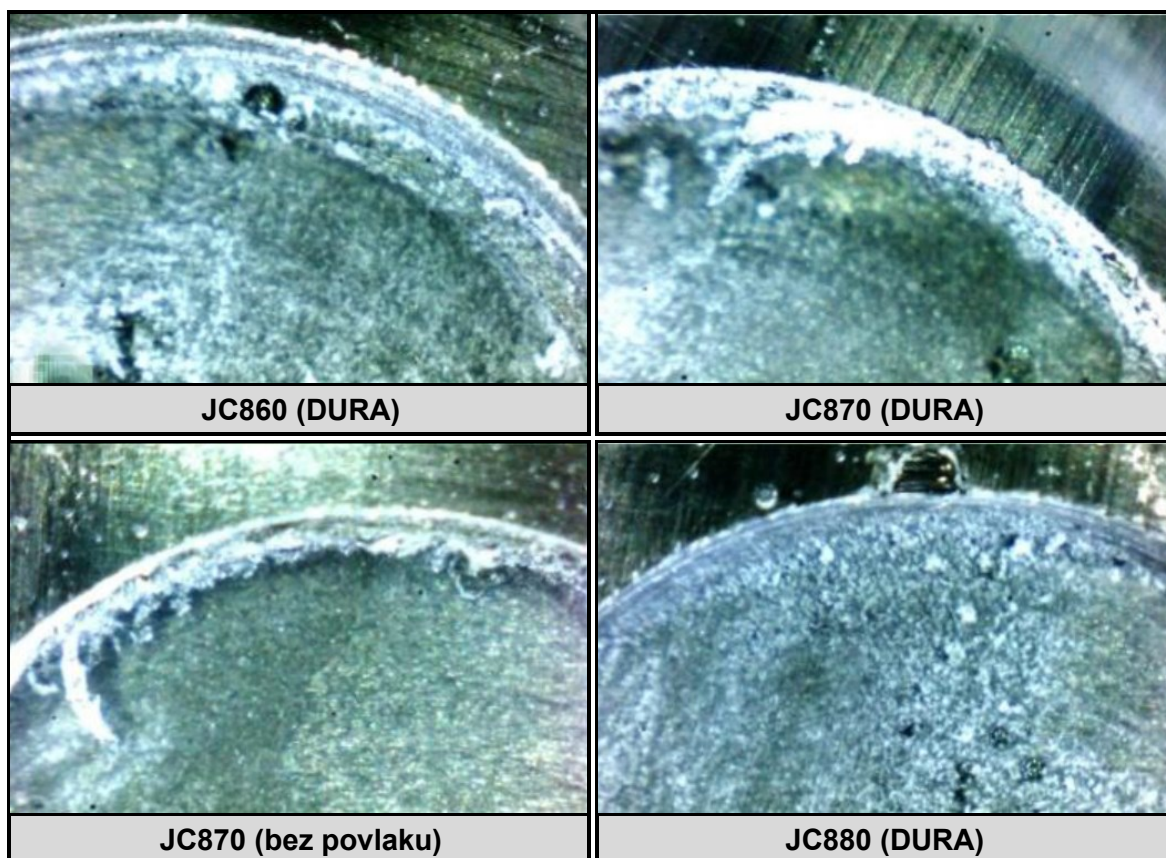


Obrázek 4.14 – Průběh řezných sil při frézování drážky nástrojem JC880 (DURA)

4.6 Kvalita obrobeného povrchu

Černá místa představují vzduchové bubliny tzv. mikrovruby, které mohou vznikat například během výroby kompozitů ručním kladením. Při měření drsnosti bylo nutné se jim vyhnout.

Ze snímků je patrné, že se jedná o čelo drážky. Na snímku obrobeného povrchu nástrojem JC870 (DURA) je vidět frézování nesousledné do osy a sousledné od osy, protože jsou frézy pravořezné nebo tak byly použity.



Obrázek 4.15 – Přehled obrobených ploch jednotlivými testovacími nástroji

4.7 Vyhodnocení

Jelikož jsou použité nástroje vyrobené ze stejného materiálu a mají podobné parametry usuzují, že v rámci experimentu dosahovali hodnoty drsnosti nejmenších hodnot u nástroje typu JC880. Drsnost povrchu určuje do jisté míry kvalitu obrobené plochy.

Jelikož se jednalo o funkční zkoušku, a ne zkoušku trvanlivosti nemám k dispozici přesné hodnoty životnosti. Proto se pouze mohu domnívat, že čím větší řezná síla, tím menší je životnost nástroje. Z naměřených hodnot řezných sil je patrné, že testovaná fréza typu JC880 bude mít větší životnost než ostatní zkoušené nástroje, protože vykazuje menší hodnoty složek řezné síly.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Obráběným materiálem byla tenkostěnná kompozitní deska, kde zásadní funkci mají řezné síly. Dosahuje se minimální deformace a co možná nejmenších vibrací.

Veškeré testovací nástroje jsem vybral z firmy SECO. Jedná se o nástroje produktové skupiny JC konkrétně typové řady JC860, JC870 a JC880 (viz 4.2).

Z ekonomického hlediska se snažím vybrat nástroj, který bude odpovídat nejlepšímu poměru mezi kvalitou obrobku a pořizovací cenou nástroje.

Tabulka 5.1 – Porovnání drsností při frézování kontury a následně drážky

Typová řada nástroje	Frézování kontury		Frézování drážky	
	R_a [mm]	R_z [μm]	R_a [mm]	R_z [μm]
JC860 (DURA)	$2,08 \pm 0,72$	$14,03 \pm 0,65$	$2,88 \pm 0,72$	$15,57 \pm 3,79$
JC870 (DURA)	$1,77 \pm 0,45$	$13,11 \pm 5,81$	$1,71 \pm 0,35$	$10,13 \pm 2,53$
JC870 (bez povl.)	$1,67 \pm 0,64$	$10,65 \pm 3,55$	$1,77 \pm 0,24$	$11,27 \pm 2,42$
JC880 (DURA)	$1,38 \pm 0,40$	$10,17 \pm 6,09$	$1,59 \pm 0,42$	$10,71 \pm 2,91$

Tabulka 5.2 – Porovnání řezných sil při frézování kontury a následně drážky

Typová řada nástroje	Frézování kontury		Frézování drážky	
	F_{fn} min./max. [N]	F_f min./max. [N]	F_{fn} min./max. [N]	F_f min./max. [N]
JC860 (DURA)	0,96/11,9	-1,42/0,88	-5,66/0,04	-0,27/3,95
JC870 (DURA)	-12,09/0,22	-2,57/0,5	-10,98/0,22	-1,42/2,42
JC870 (bez povl.)	-13,74/0,41	-1,80/3,95	-6,57/0,04	-0,27/5,10
JC880 (DURA)	-7,49/0,41	-0,65/1,65	-4,37/0,41	-4,87/2,03

Nástroje typu JC870 mají dvě šroubovice, které tlačí proti sobě. Proto jsou z hlediska delaminace kompozitního materiálu lepší. U nástroje JC860 se odtrhává spodní vrstva a tím fixuje vrstvu horní. U nástroje JC880 se jedná o přesný opak. Jednoznačným favoritem je fréza JC 880, sice u něj dochází k odtrhávání vrchní (povrchové) vrstvy, čímž ale fixuje vrstvu spodní obrobeneho kompozitu. Při frézování drážky se jedná o poškození do boku, ovšem neměl jsem k dispozici hodnoty drsnosti bočních stěn ani fotografie obráběných drážek, které by umožňovaly porovnání delaminace při sousledném a nesousledném frézování. Tudíž nemohu s přesností určit, zda se jedná o skutečně nejlepší řešení.

ZÁVĚR

Hlavní myšlenka bakalářské práce je stanovení kritérií, podle kterých se určí návrh vhodného nástroje v tomto případě pro obrábění uhlíkových kompozitních materiálů.

Při výběru nástroje je potřeba si nejprve vytyčit, zda se bude jednat o výrobu jednoho kusu, nebo výrobu malosériovou či hromadnou. Pokud se jedná o frézování jednoho kusu například za účelem opravy poškozené části, doporučuji nástroj typové řady JC870 bez povlaku. Argument je takový, že rozhodujícím faktorem je pořizovací cena. U výroby velkého množství kusů (hromadné výroby) navrhuji nástroj typové řady JC880, protože je neodmyslitelná produktivita i minimální cena nákladů.

Dalším možným požadavkem je výsledná kvalita obrobené plochy. Zde je nutné zvolit nástroj, který dosahuje nejmenších možných drsností povrchu a zároveň u něj dochází k co nejmenší delaminaci. V rámci dosažených hodnot jsem toho názoru, že vhodnou volbou je nástroj typové řady JC880. Je to z toho důvodu, že břity nástroje jsou relativně ostré a současně kontinuální (neobsahují děliče třísky). Tzn. vykazuje nižší úroveň řezných síl spolu s minimální cyklickou složkou.

Za předpokladu, že je nejdůležitějším kritériem přesnost požadovaných rozměrů, doporučuji zvolit opět typovou řadu nástroje JC880. Odpovídají tomu naměřené hodnoty šířky drážky.

Jestliže je pro zákazníka rozhodujícím faktorem cena, pak je jasným favoritem nástroj typové řady JC870 bez povlaku. Z důvodu nejmenší pořizovací ceny.

Nakonec jsem došel k závěru, že není možné jednoznačně určit jeden nástroj, který by splňoval veškeré požadavky. Je nutné vybrat nástroj na základě požadované specifikace. Ovšem z naměřených řezných sil a drsností jsem zjistil, že nástroj typové řady JC880 dosahuje velmi dobrých hodnot v porovnání s ostatními nástroji. Jeho hlavním negativním parametrem je pořizovací cena, a proto bych ho jednoznačně doporučil pro obrábění ať už v malosériové nebo velkosériové výrobě.

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. za poskytnuté připomínky a znalecké rady k tématu bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Dormer Pramet s. r. o., především panu Ing. Romanu Maršíčkovi za poskytnuté materiály a spolupráci formou odborných konzultací.

Seznam použité literatury

- [1] *Strojírenské materiály: Rozdělení obráběných materiálů a tabulky ekvivalentů* [online]. 2005 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://strojari.blog.cz/galerie/obrabeni/obrazek/97371700>
- [2] *Strojírenská technologie část I. – II.* [online]. 2011 [cit. 2020-05-18]. Studijní text.
- [3] DULA, Jan. *Sbližování teorie s praxí: Obrábění nekovových materiálů* [online]. Uherské hradiště, 2012 [cit. 2020-05-18]. Střední odborná škola technická Uherské Hradiště. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szesgsm/files/sblizovani/pdf/obr-nekovu.pdf>
- [4] Kratochvíl B., Švorčík V., Vojtěch D. *Úvod do studia materiálů*. 1. vydání. ISBN 80-7080-568-4. 2005.
- [5] SlidePlayer, *Technické nekovové materiály* [online]. 2020. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2850736/>
- [6] *Složení polymerů – přísady*. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/05.html>
- [7] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [8] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK, VOJTĚCH H, Dalibor. *Úvod do studia materiálů* [online]. 1.vyd. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. [cit. 2020-05-18]. ISBN 80-708-0568-4. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pages-pdf/170.html
- [9] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [10] *O plastech*. TEKA v.o.s. [online]. 2014. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.tekavos.cz/index.php/o-plastech>
- [11] JANOVEC, Jan. *Technické materiály v primárním a preprimárním vzdělávání*. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2013. ISBN isbn978-80-7414-596-4.
- [12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [13] *Kompozity s bioplňivy – úspěšné řešení z České republiky* – Gate2Biotech.cz. Gate2Biotech - Vše o českých biotechnologiích na jednom místě [online]. 2006 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://www.gate2biotech.cz/kompozity-s-bioplnavy-uspesne-reseni-z-ceske-republiky/>
- [14] Greelane.cz, *Jaká je definice z kompozitního materiálu?* Dostupné z: <https://www.greelane.com/ca/science-tech-math/v%C4%9Bda/what-is-a-composite-820406/>

- [15] VRBKA J., *Mechanika kompozitů*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008.
- [16] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 156 s. ISBN 80-704-3273-X.
- [17] JANCÁR, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitu*. 1. vyd. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5
- [18] ČVUT: *Kompozity – Vláknové polymerní – Úvod, technologie, praktické aplikace*. Dostupné z: <https://www.zadani-seminarky.cz/prezentace/kompozity-vlaknove-polymerni-uvod-technologie-prakticke-aplikace-stavebnictvi-letectvi-automotive/6077>
- [19] GUINAUDEAU, Antony. SECOTOOLS. *Kompozity*. Warsaw, 10.2011.
- [20] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3
- [21] K. DAĐOUREK, *Kompozitní materiály – druhy a jejich využití*, TU V Liberci, 2007.
- [22] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [23] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [24] LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Přeložil Jan JEHLIČKA. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 80-86073-82-3.
- [25] HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2003. 138 stran. [online]. [cit. 2020-05-18].
- [26] *Problémy při obrábění kompozitních materiálů*. SEDLÁČEK, J., VUT V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství. MM - Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabenikompozitnich-materialu.html>
- [27] SEDLÁČEK, J. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*: Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2010. 104 s, 7 příloh. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.
- [28] SEDLÁČEK, Jan. *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů*. MM Průmyslové spektrum. Červen 2006. č. 6, s. 28–30. ISSN 1212–2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabenikompozitnich-materialu.html>

- [29] SEDLÁČEK, Jan. *EFEKTIVNÍ Obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*. Brno, 2010. Disertační práce. VUT Brno.
- [30] Seco Tools.cz, Řada JC800 composite široký sortiment vysoce výkonných řešení pro obrábění kompozitních. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/621>
- [31] Seco Tools.cz, Monolitní karbidové frézy pro obrábění kompozitních materiálů – fréza 860060Z5.0-DURA, Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02720211
- [32] Seco Tools.cz, Monolitní karbidové frézy pro obrábění kompozitních materiálů – fréza 870060.0-DURA, Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02720228
- [33] Seco Tools.cz, Monolitní karbidové frézy pro obrábění kompozitních materiálů – fréza 870060.0, Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02742794
- [34] Seco Tools.cz, Monolitní karbidové frézy pro obrábění kompozitních materiálů – fréza 880060R020Z4.0-DURA, Dostupné: https://www.secotools.com/article/p_02720258

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 – Skupina materiálů dle ISO 513 [1]	13
Obrázek 1.2 – Schéma základního rozdělení technických nekovových materiálů.....	14
Obrázek 1.3 – Přehled různých materiálů [3]	14
Obrázek 2.1 – Synergický efekt [9].....	16
Obrázek 2.2 – Základní rozdělení kompozitních materiálů podle výztuže [16]	20
Obrázek 2.3 – Prostorové uspořádání [17]	21
Obrázek 2.4 – Typy vláknových kompozitů [18].....	21
Obrázek 2.5 – Druhy tkanin [19].....	21
Obrázek 2.6 – Struktura uhlíkového vlákna [21]	22
Obrázek 2.7 – Srovnání velikosti vlasu a uhlíkového vlákna (černá)[21].....	22
Obrázek 2.8 – Polymerace, vytvoření polyethylenu [11]	23
Obrázek 2.9 – Polyadice, vznik polyesteru [11]	23
Obrázek 2.10 – Polykondenzace, vznik polyuretanu [11]	23
Obrázek 2.11 – příklad metod výroby kompozitů s plastovou maticí.....	24
Obrázek 2.12 – Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN [21].....	25
Obrázek 2.13 – Porovnání struktury [24]	26
Obrázek 2.14 – Náporný příklad delaminace při vrtání [26]	28
Obrázek 2.15 – Základní oblasti tvorby třísky [27].....	29
Obrázek 2.16 – Způsob oddělování materiálu typ I nalevo a typ II napravo [27]	30
Obrázek 2.17 – Způsob oddělení materiálu při orientaci vláken rovno 45°[27]	30
Obrázek 2.18 – Oddělování materiálu nalevo vláken s orientací rovno 90° a napravo 135° [27]	30

<i>Obrázek 4.1 – Fréza typové řady JC860 s povlakem DURA [31]</i>	36
<i>Obrázek 4.2 – Fréza typové řady JC870 s povlakem DURA [32]</i>	37
<i>Obrázek 4.3 – Fréza typové řady JC870 bez povlaku [33]</i>	37
<i>Obrázek 4.4 – Fréza typové řady JC880 s povlakem DURA [34]</i>	38
<i>Obrázek 4.5 – Náčrt frézování kontury</i>	40
<i>Obrázek 4.6 – Náčrt frézování drážky</i>	41
<i>Obrázek 4.7 – Průběh řezných sil při frézování kontury nástrojem JC860 (DURA)</i>	42
<i>Obrázek 4.8 – Průběh řezných sil při frézování kontury nástrojem JC870 (DURA)</i>	43
<i>Obrázek 4.9 – Průběh řezných sil při frézování kontury nástrojem JC870 (bez povlaku)</i> ..	43
<i>Obrázek 4.10 – Průběh řezných sil při frézování kontury nástrojem JC880 (DURA)</i>	43
<i>Obrázek 4.11 – Průběh řezných sil při frézování drážky nástrojem JC860 (DURA)</i>	44
<i>Obrázek 4.12 – Průběh řezných sil při frézování drážky nástrojem JC870 (DURA)</i>	44
<i>Obrázek 4.13 – Průběh řezných sil při frézování drážky nástrojem JC870 (bez povlaku)</i> ..	45
<i>Obrázek 4.14 – Průběh řezných sil při frézování drážky nástrojem JC880 (DURA)</i>	45
<i>Obrázek 4.15 – Přehled obrobených ploch jednotlivými testovacími nástroji</i>	46

Seznam tabulek

<i>Tabulka 4.1 – Specifikace monolitní karbidové frézy řady JC860 (DURA) [31]</i>	36
<i>Tabulka 4.2 – Specifikace monolitní karbidové frézy řady JC870 (DURA) [32]</i>	37
<i>Tabulka 4.3 – Specifikace monolitní karbidové frézy řady JC870 (bez povlaku) [33]</i>	37
<i>Tabulka 4.4 – Specifikace monolitní karbidové frézy řady JC880 (DURA) [34]</i>	38
<i>Tabulka 4.5 – Porovnání parametrů testovaných nástrojů</i>	39
<i>Tabulka 4.6 – Mechanické vlastnosti uhlíkového kompozitního materiálu</i>	40
<i>Tabulka 4.7 – Řezné podmínky při frézování kontury</i>	41
<i>Tabulka 4.8 – Řezné podmínky při frézování drážky</i>	42
<i>Tabulka 4.9 – Hodnoty drsností a řezných sil naměřené při frézování kontury</i>	42
<i>Tabulka 4.10 – Hodnoty šířek drážky, drsností a řezných sil naměřené při frézování drážky</i>	44
<i>Tabulka 5.1 – Porovnání drsností při frézování kontury a následně drážky</i>	47
<i>Tabulka 5.2 – Porovnání řezných sil při frézování kontury a následně drážky</i>	47